

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Analýza optických parametrů prvků vyrobených z  
polydimethylsiloxanu (PDMS) s různými poměry tvrdidla**

**Analysis of the optical parameteres of the elements made of  
polydimethylsiloxane (PDMS) with different ratios of hardener**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Hai Dat Pham**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

**Analýza optických parametrů prvků vyrobených z polydimethylsiloxanu (PDMS) s různými poměry tvrdidla.**

**Analysis of the optical parameters of the elements made of polydimethylsiloxane (PDMS) with different ratios of hardener.**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Polydimethylsiloxan je díky svým optickým vlastnostem perspektivním polymerem pro výrobu optických prvků. Cílem práce je výroba série optických prvků z polydimethylsiloxanu s různými poměry tvrdidla a následné změření jejich optických parametrů. Body práce:

1. Zpracujte rešerši zabývající se polydimethylsiloxanem.
2. Vytvořte sérii optických prvků z polydimethylsiloxanu s různými poměry tvrdidla.
3. Proměřte optické parametry jednotlivých optických prvků.
4. Dle získaných údajů porovnejte parametry jednotlivých kusů s různými poměry a vše přehledně shrňte.

Seznam doporučené odborné literatury:

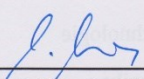
- [1] DAUM, V., J. KRAUSER, P.E. ZAMZOW a O. ZIEMANN. POF - Polymer optical fiber for data communication. Berlin, 2001. ISBN 3-540-42009-6.
- [2] DAUM, V., J. KRAUSER a O. ZIEMANN. POF Handbook : optical short range transmission systems. Springer, 2001. ISBN 978-3-540-76628-5.
- [3] WEINERT, Andreas. Plastic optical fibers: principles, components, installation. Erlangen: Publicis MCD Verlag, c1999. ISBN 3895781355.
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.

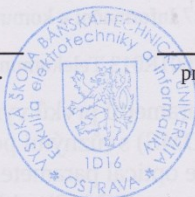
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Zbořil**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

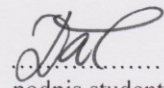


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 24. dubna 2017

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Ondřeji Zbořilovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Podstatou této bakalářské práce je realizace optických vlnovodů z polydimethylsiloxanu (PDMS) s různými poměry tvrdidla a následná analýza jejich optických parametrů. Cílem je určit nejvhodnější poměr pro optické komunikace.

V práci je popsáno počáteční experimentování s výrobní metodou optických vlnovodů a následné zvolení nejefektivnějšího postupu. Po zvládnutí výrobního procesu bylo úkolem sestavit vlastní měřicí sestavu použitím stavebnice od firmy ThorLabs a LED zdrojů záření. Závěrečný úkol se skládal z měření optických vlastností optických vlnovodů za pomoci vytvořené měřicí sestavy a nakonec porovnání naměřených parametrů jednotlivých poměrů.

## **Klíčová slova**

Index lomu, polydimethylsiloxan, PDMS, Silikon, optické vlákno, útlum

## **Abstract**

The purpose of this thesis is a production of optical waveguides from a polydimethylsiloxane (PDMS) with different ratios of hardener, and subsequently, to investigate their optical parameters. The aim is to determine the most suitable ratio for the optical communication.

In the thesis is described the initial experimenting with the production method of the optical waveguides and subsequent selection of the most effective procedure. After managing the production process, the next step was to build a measuring system using a construction kit of the company Thorlabs and the LED light sources. The final task consisted of measuring the optical properties of each waveguide by using the measuring system and subsequent comparison the ratios between each other.

## **Key words**

Attenuation, polydimethylsiloxane, PDMS, silicon, optical fiber, refractive index

## Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 10 -
Seznam použitých zkratk.....	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 12 -
Úvod.....	- 14 -
1 Optické vlákno .....	- 15 -
1.1 Princip šíření světla v optickém vlákne .....	- 15 -
1.2 Typy optických vláken.....	- 16 -
1.2.1 Jednovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu.....	- 16 -
1.2.2 Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu .....	- 17 -
1.2.3 Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu .....	- 18 -
1.2.4 Polymerová optická vlákna - POF.....	- 18 -
1.3 Typy polymerových optických vláken.....	- 19 -
1.3.1 SI-POF.....	- 19 -
1.3.2 Low-NA-POF .....	- 20 -
1.3.3 DSI-POF .....	- 20 -
1.3.4 MC-SI-POF .....	- 21 -
1.3.5 DSI-MC-POF .....	- 21 -
1.3.6 GI-POF .....	- 22 -
1.3.7 MSI-POF .....	- 22 -
1.4 Útlum a disperze na optických vláknech .....	- 23 -
1.4.1 Materiálová absorpce .....	- 23 -
1.4.2 Lineární rozptyl.....	- 24 -
1.4.3 Nelineární rozptyl.....	- 24 -
1.4.4 Ohybové ztráty .....	- 24 -
1.4.5 Disperze.....	- 25 -
2 Polydimethylsiloxan.....	- 26 -
2.1 Úvod.....	- 26 -
2.2 Využití PDMS v praxi.....	- 26 -
2.3 Sylgard .....	- 27 -
2.3.1 Sylgard 160.....	- 27 -
2.3.2 Sylgard 170.....	- 27 -



2.3.3	Sylgard 182 a 184.....	- 27 -
2.3.4	Sylgard 517.....	- 27 -
2.4	Vlastnosti Sylgardu.....	- 28 -
3	Metody měření útlumu.....	- 29 -
3.1	Metoda dvou délek.....	- 29 -
3.2	Metoda vložných ztrát.....	- 30 -
3.3	Metoda zpětného rozptylu - OTDR.....	- 30 -
3.3.1	Přístroj OTDR .....	- 31 -
4	Výroba optického vlnovodu s různými poměry tvrdidla.....	- 32 -
4.1	Příprava směsi.....	- 32 -
4.2	Tvorba vlnovodů.....	- 33 -
5	Měřicí pracoviště.....	- 37 -
5.1	Měřicí sestava .....	- 37 -
5.2	Měřicí přístroje a zdroj světla .....	- 38 -
5.2.1	Parametry.....	- 38 -
5.2.2	Blokové schéma zapojení.....	- 39 -
5.3	Abbého refraktometr .....	- 40 -
5.3.1	Parametry.....	- 40 -
6	Praktické měření.....	- 41 -
6.1	Měření útlumu.....	- 41 -
6.1.1	Poměr 10:1 .....	- 41 -
6.1.2	Poměr 8:1 .....	- 42 -
6.1.3	Poměr 12:1 .....	- 43 -
6.1.4	Poměr 14:1 .....	- 44 -
6.2	Měření indexu lomu.....	- 45 -
6.2.1	Bílá barva .....	- 46 -
6.2.2	Modrá barva – 470 nm .....	- 47 -
6.2.3	Zelená barva – 530 nm .....	- 47 -
6.2.4	Žlutá barva – 590 nm.....	- 48 -
6.2.5	Červená barva – 624 nm.....	- 49 -
6.2.6	Zhodnocení.....	- 50 -
	Závěr .....	- 51 -
	Použitá literatura .....	- 52 -

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>A</b>	dB	Útlum
<b>a</b>	dB · km <sup>-1</sup>	Měrný útlum
<b>E</b>	V · m <sup>-1</sup>	Dielektrická pevnost
<b>n<sub>1</sub></b>	-	Index lomu jádra
<b>n<sub>2</sub></b>	-	Index lomu pláště
<b>P<sub>1</sub></b>	W	Vstupní výkon
<b>P<sub>2</sub></b>	W	Výstupní výkon
<b>l</b>	km	Délka vlákna
<b>V</b>	-	Normalizovaná frekvence
<b>r</b>	m	Poloměr
<b>λ</b>	nm	Vlnová délka
<b>π</b>	3,14	Konstanta pí
<b>θ<sub>a</sub></b>	°	Úhel navázání
<b>θ<sub>cl</sub></b>	°	Mezní úhel na rozhraní jádra a pláště
<b>α<sub>c</sub></b>	°	Mezní úhel šíření
<b>ε</b>	-	Relativní permitivita
<b>ζ</b>	Ω · m <sup>-1</sup>	Rezistivita

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode - Standart pro vysokorychlostní síťovou architekturu
<b>DSI-MC-POF</b>	Multiple Cores Double Step Index-Polymer Optical Fiber – Vícejádrové polymerové optické vlákno s dvojitým skokovým indexem lomu
<b>DSI-POF</b>	Double Step Index-Polymer Optical Fiber – Polymerové optické vlákno s dvojitým skokovým indexem lomu
<b>GI-POF</b>	Graded Index-Polymer Optical Fiber – Polymerové optické vlákno s plynulou změnou indexu lomu
<b>LED</b>	Light Emitting Diode – Dioda emitující světlo
<b>Low-NA-POF</b>	Low-Numerical Aperture-Polymer Optical Fibre – Polymerové optické vlákno se sníženou hodnotou numerické apertury
<b>MC-SI-POF</b>	Multiple Cores Step Index-Polymer Optical Fiber – Vícejádrové polymerové optické vlákno se skokovým indexem lomu
<b>MSI-POF</b>	Multicore Step Index-Polymer Optical Fiber – Polymerové optické vlákno s vícenásobným skokovým indexem lomu
<b>NA</b>	Numerical Aperture – Numerická Apertura
<b>OTDR</b>	Optical Time Domain Reflectometry
<b>PDMS</b>	Polydimethylsiloxane – Polydimethylsiloxan
<b>POF</b>	Polymer Optical Fibre – Polymerové optické vlákno
<b>SI-POF</b>	Step-Index-Polymer Optical Fiber – Polymerové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Struktura optického vlákna	15
1.2	Princip šíření světla v optickém vlákně	16
1.3	Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu	17
1.4	Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu	17
1.5	Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu	18
1.6	Rayleighův rozptyl	19
1.7	Srovnání velikosti průměru POF s křemíkovými vlákny	21
1.8	Profil indexu lomu SI-POF	22
1.9	Profil indexu lomu Low-NA-POF	23
1.10	Profil indexu lomu DSI-POF	23
1.11	Profil indexu lomu MC-SI-POF	24
1.12	Profil indexu lomu DSI-MC-POF	24
1.13	Profil indexu lomu GI-POF	25
1.14	Profil indexu lomu MSI-POF	25
3.1	Metoda dvou délek	29
3.2	Metoda vložných ztrát	29
3.3	Blokové schéma OTDR přístroje	31
4.1	Sylgard 184 s tvrdidlem a pomůcky	32
4.2	Vlevo – čerstvě promíchaná směs, vpravo – odstátá směs po 5 hodinách v lednici	33
4.3	Silikonová hadička vložená v kovové trubici	34
4.4	Stavebnice Meker s uzavřenými hadičkami	34
4.5	Čistý optický vlnovod a vlnovod se vzduchovými bublinami	35
4.6	Oddělení vlnovodu od formy	35
4.7	Konstrukce k řezání vlnovodů	36
4.8	Vpravo – řez provedený sestavenou konstrukcí, vlevo – řez provedený keramickým nožem	36
5.1	Měřicí sestava	37
5.2	Zdroj Statron Labornetzgerät Typ 2229	38

---

<b>5.3</b>	Blokové schéma	39
<b>5.4</b>	Refraktometr ABBE AR4	40
<b>6.1</b>	Průměrný měrný útlum poměru 10:1	42
<b>6.2</b>	Průměrný měrný útlum poměru 8:1	43
<b>6.3</b>	Průměrný měrný útlum poměru 12:1	44
<b>6.4</b>	Průměrný měrný útlum poměru 14:1	45
<b>6.5</b>	Plátky silikonu	45
<b>6.6</b>	Nitkový kříž	46
<b>6.7</b>	Index lomu poměrů na bílé barvě	46
<b>6.8</b>	Index lomu poměrů na modré barvě	47
<b>6.9</b>	Index lomu poměrů na zelené barvě	48
<b>6.10</b>	Index lomu poměrů na žluté barvě	48
<b>6.11</b>	Index lomu poměrů na červené barvě	49

<b>Číslo tabulky</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
<b>2.1</b>	Sourhn vlastnosti Sylgardu 182 a 184	28
<b>5.1</b>	Základní parametry LED diod	39
<b>6.1</b>	Naměřené hodnoty poměru 10:1	41
<b>6.2</b>	Naměřené hodnoty poměru 8:1	42
<b>6.3</b>	Naměřené hodnoty poměru 12:1	43
<b>6.4</b>	Naměřené hodnoty poměru 14:1	44
<b>6.5</b>	Naměřené hodnoty indexu lomu na bílé barvě	46
<b>6.6</b>	Naměřené hodnoty indexu lomu na modré barvě	47
<b>6.7</b>	Naměřené hodnoty indexu lomu na zelené barvě	47
<b>6.8</b>	Naměřené hodnoty indexu lomu na žluté barvě	48
<b>6.9</b>	Naměřené hodnoty indexu lomu na červené barvě	49
<b>6.10</b>	Index lomu uváděný výrobcem	50

## Úvod

Polydimethylsiloxan je nejpoužívanější polymer založený na bázi křemíku a je především známý pro svoje dobré mechanické a elektrické vlastností. Díky těmto vlastnostem má polydimethylsiloxan velké využití v mnoha oblastech průmyslu. Tato práce se bude především zabývat optickými vlastnostmi tohoto perspektivního materiálu.

Cílem této bakalářské práce je výroba optických válcových vlnovodů z polydimethylsiloxanu s různými poměry tvrdidla, následována analýzou optických parametrů jednotlivých vlnovodů a vliv různých poměrů tvrdidla na tyto parametry.

Práce bude rozvržena následujícím způsobem. První kapitola bude zaměřená na popis základní struktury optického vlákna, materiály použité při výrobě těchto vláken, základní princip, na kterém je založený samotný způsob přenosu světla přes tyto vlnovody a vlivy způsobující nežádoucí navýšení hodnoty útlumu nebo zkreslení. Dále se tato kapitola bude zabývat jednotlivými typy skleněných a polymerových optických vláken a jejich odlišnými způsoby vedení světelných paprsků. Druhá kapitola bude věnována samotnému polydimethylsiloxanu, kde bude zmíněno jeho využití v různých oblastech průmyslu a jeho obecné vlastností. Poslední kapitola teoretické části bude zaměřená na metody měření útlumu v podobě destruktivní metody dvou délek, metody vložných ztrát a metody zpětného odrazu (OTDR).

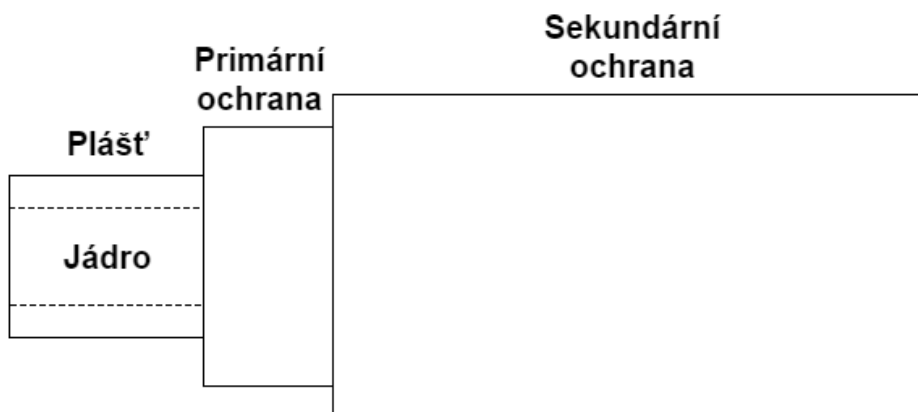
Praktická část práce se bude zabývat výrobou vlnovodů z polydimethylsiloxanu s různými poměry tvrdidla. Po vytvoření jednotlivých vlnovodů bude následovat analýza optických parametrů a vliv poměrů na tyto parametry. Avšak před měřením bude nutné zkonstruovat měřicí sestavu, která bude splňovat všechny požadované funkce.

# 1 Optické vlákno

Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod, který se v dnešní době využívá především pro přenos dat v telekomunikacích. Při jeho použití je možné přenést obrovské množství informací na velké vzdálenosti při použití metod jako je například multiplexování. Způsob přenosu spočívá v šíření světla na základě principu úplného (totálního) odrazu na rozhraní dvou optických prostředí s rozdílnými indexy lomu.[1]

Optická vlákna jsou většinou zhotovena z křemenného, chalkogenního nebo halogenidového skla, popřípadě krystalických polovodičů nebo polymerů a jako takové je velmi náchylné na mechanické poškození, které zhoršuje jeho přenosové vlastnosti. Z toho důvodu je optické vlákno potaženo primární a sekundární ochranou.

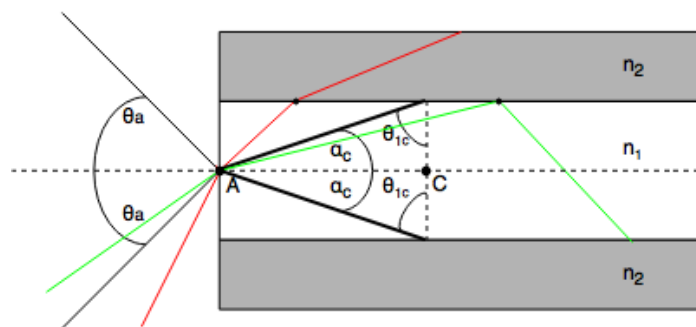
Primární ochrana je na vlákno nanесena v podobě akrylového laku, který jej chrání před mikro ohyby, teplotními vlivy, zvyšuje jeho celkovou pevnost a zajišťuje snadnější manipulaci. Sekundární ochranu lze aplikovat dvěma způsoby. Jako první možnost lze použít tzv. těsnou sekundární ochranu, která se nabaluje přímo na primární ochranu. Druhá možnost je aplikování sekundární ochrany volně, při níž se vlákna uloží, jak název napovídá, volně nebo do trubičky s ochranným gelem. Sekundární ochrana je určená typem kabelu a chrání vlákno před mechanickým poškozením.



Obrázek 1.1: *Struktura optického vlákna*

## 1.1 Princip šíření světla v optickém vlákně

Jak už bylo výše zmíněno světlo se šíří optickým vlnovodem na základě principu totálního odrazu, který nastává na rozhraní dvou optických rozhraní s odlišnou hodnotou indexu lomu. V případě optického vlákna jde o index lomu jádra a pláště. Pro šíření světla v optickém vlákne musí být index lomu jádra větší než index lomu pláště a paprsek musí dopadat pod úhlem větším než je úhel mezní. Pokud by paprsek dopadal pod úhlem menším, než je úhel mezní došlo by k jeho vyvázání ven z jádra, a v důsledku ke ztrátě výkonu.



Obrázek 1.2: Princip šíření světla v optickém vlákně

Největší úhel, pod kterým může světlo vstupovat do optického vlákna, nám definuje numerická apertura (NA).

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1)$$

Kde  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště.

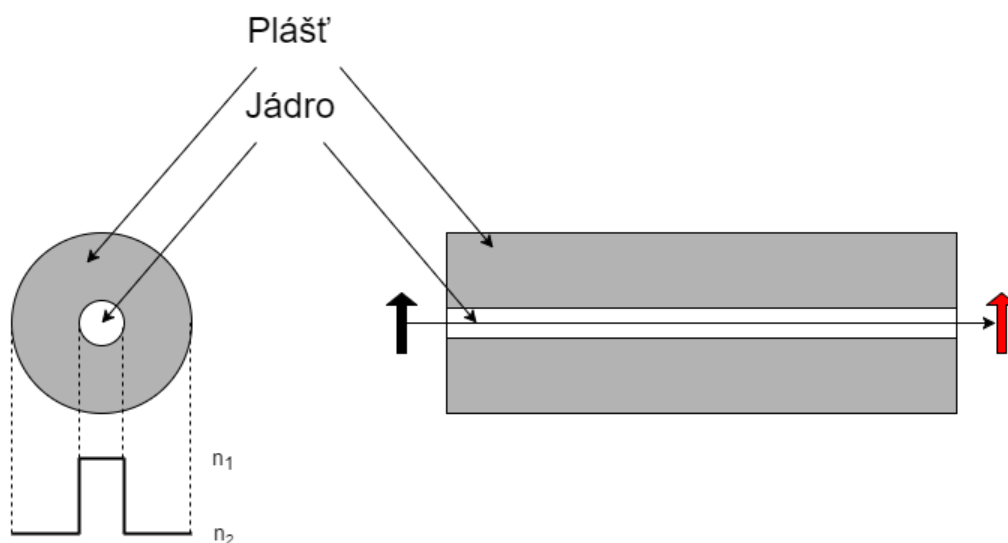
## 1.2 Typy optických vláken

Z hlediska konstrukce, způsobu a množství vedených vidů, dělíme optická vlákna na jednovidová se skokovou změnou, mnohovidová se skokovou změnou a mnohovidová s gradientní změnou indexu lomu. Každý typ má odlišné vlastnosti a v praxi je použit na jiné účely.[2]

### 1.2.1 Jednovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu

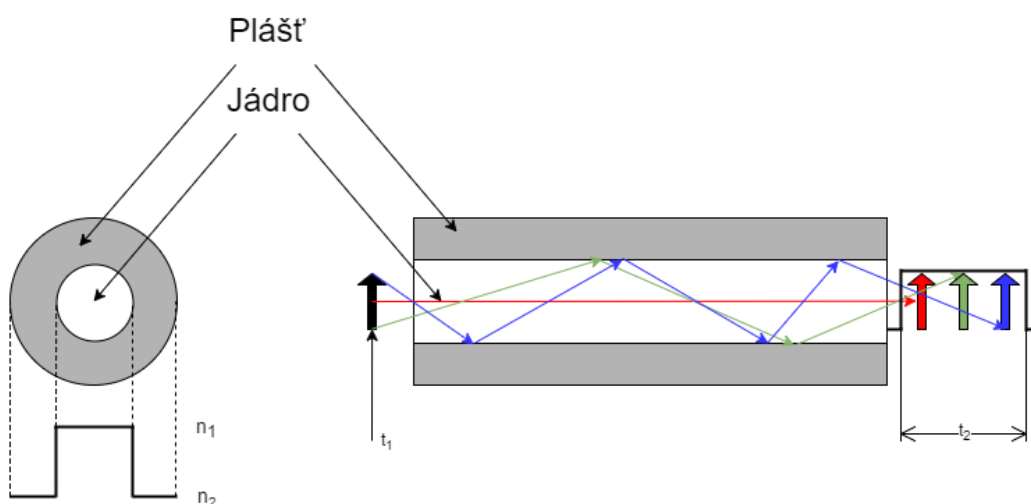
Jednovidová vlákna se používají především v páteřních sítích na velké vzdálenosti. Ze všech typů vláken mají nejlepší přenosové parametry pro optické přenosové cesty. Jejich použitím se eliminuje vidová disperze, která je primárním problémem u mnohovidových vláken, ale naopak zde vzniká polarizační vidová disperze. Jádro vlákna má průměr v rozmezí 4-10  $\mu\text{m}$ , přes které se přenáší jediný vid na základě principu totálního odrazu, ale téměř axiálně o vlnové délce od 300 nm do 1600 nm. Zde platí, čím vyšší vlnovou délku má přenášený vid, tím větší musí být průměr jádra (např. pro 1300 nm je použitý průměr jádra okolo 9  $\mu\text{m}$ ). [1][2]



Obrázek 1.3: *Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu*

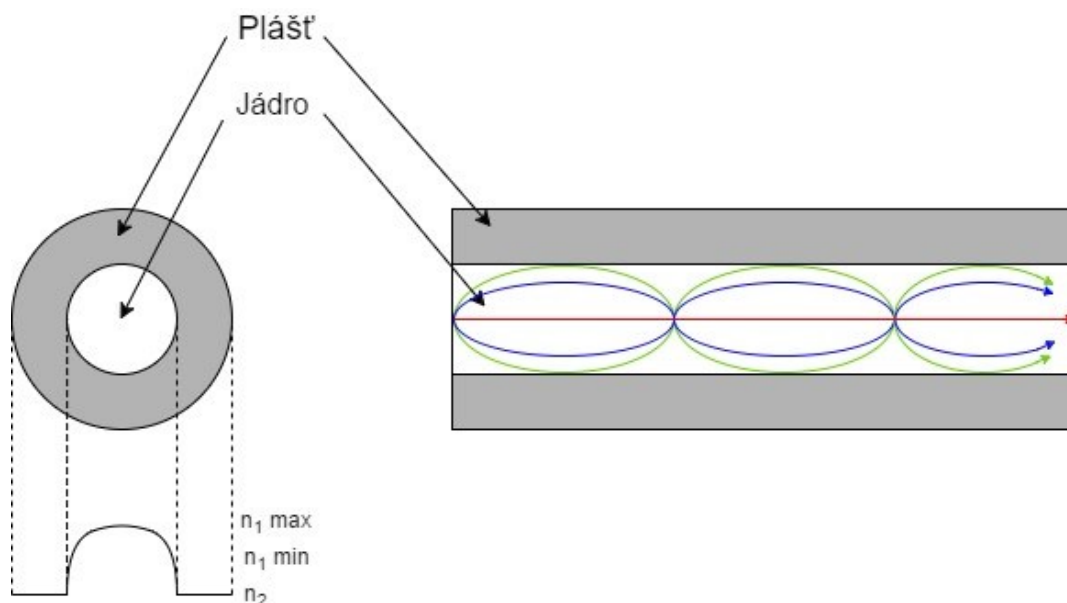
### 1.2.2 Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

Tímto vláknem se šíří více vidů zároveň pomocí totálního odrazu. Jednotlivé vidy vstupují do vlákna pod různými úhly, šíří se celým vláknem za pomoci totálního odrazu stejnou rychlostí, ale po rozdílných drahách. Na výstup pak dorazí každý vid v jiném časovém okamžiku. To v důsledku způsobuje zkreslení přijímaného signálu a zamezuje využití vyšších přenosových rychlostí. Tento jev se nazývá vidová disperze. Podmínkou je, aby vidová disperze nepřerostla přes určitou maximální mez, kde by už detektor na výstupu nebyl schopný rozpoznat původní informaci. Kvůli této vlastnosti nejsou mnohovidová vlákna vhodná pro přenos na velké vzdálenosti, kde by se s narůstající délkou zvyšovalo i zkreslení signálu. Průměr jádra je oproti jednovidovým vláknům mnohem větší, typicky 50  $\mu\text{m}$  až 2000  $\mu\text{m}$ . [2]

Obrázek 1.4: *Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu*

### 1.2.3 Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

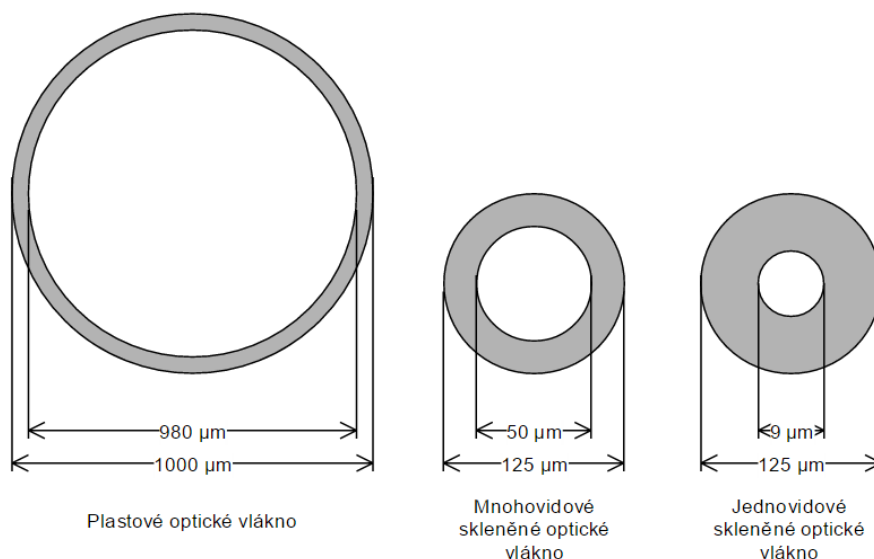
Vidy se v tomto vlákne oproti vlákne se skokovou změnou šíří na základě ohybu různou rychlostí a po různých drahách. Ohyb paprsku je způsoben postupným průběhem indexu lomu v profilu vlákna, kdy dochází k jeho několikanásobnému lomu od kolmice, pak se odrazí a několikanásobně láme ke kolmici. Po průchodu středem optického vlákna se vše opakuje a tím dochází k ohybu paprsku. Na konec vlákna dorazí jednotlivé vidy v menším časovém rozmezí, vidová disperze je tudíž u tohoto vlákna mnohem menší než u vlákna se skokovou změnou indexu lomu.



Obrázek 1.5: Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

### 1.2.4 Polymerová optická vlákna - POF

Polymerová optická vlákna nebo taky plastová optická vlákna se začala používat v 70. letech 20. století. Nejčastěji jsou vyráběna o průměru 1000  $\mu\text{m}$ , kde jádro tvoří 980  $\mu\text{m}$  z celkové velikosti. Oproti křemíkovým vláknům mají lepší mechanické vlastnosti, větší pružnost, vysokou teplotní odolnost až 200  $^{\circ}\text{C}$  a jsou výrazně snadnější na instalaci, jelikož nevyžadují použití speciálních nástrojů. I přes všechny tyto výhody plastová vlákna nenahrazují křemíkové vlákna, protože jejich útlum je několikanásobně vyšší. Na počátku hodnota útlumu plastových vláken dosahovala až 1000 dB/km. Postupem času se útlum podařilo snížit na 10 až 200 dB/km podle použitého materiálu, ale i tak se jedná o výrazně vyšší hodnotu oproti křemíkovým vláknům, u kterých je možné dosáhnout hodnoty útlumu pod 1 dB/km. Plastová vlákna tak nachází uplatnění především v lokálních sítích na desítky, maximálně stovky metrů ke spojení s přístupovými sítěmi.[3][4]



Obrázek 1.6: Srovnání velikosti průměru POF s křemíkovými vlákny

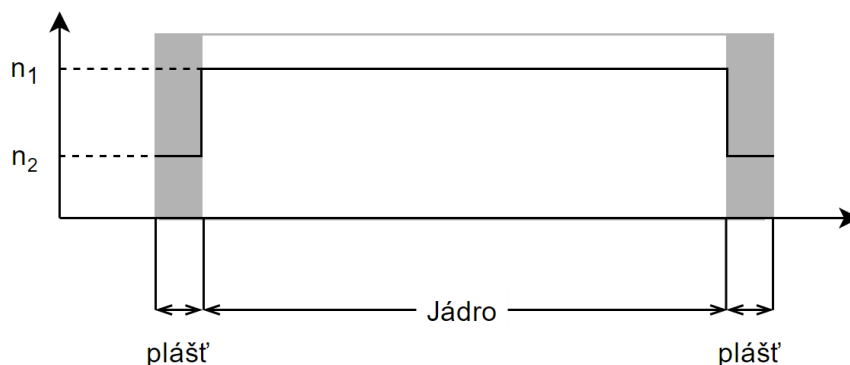
Plastové optické vlákna se používají především v mnohovidovém provedení. Schopnost přenášet různý počet vidů u plastových vláken určuje V-parametr. Pokud je hodnota V-parametru menší než 2,405, bude se vláknem přenášet pouze jeden vid.[3]

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \cdot NA \quad (1.4)$$

## 1.3 Typy polymerových optických vláken

### 1.3.1 SI-POF

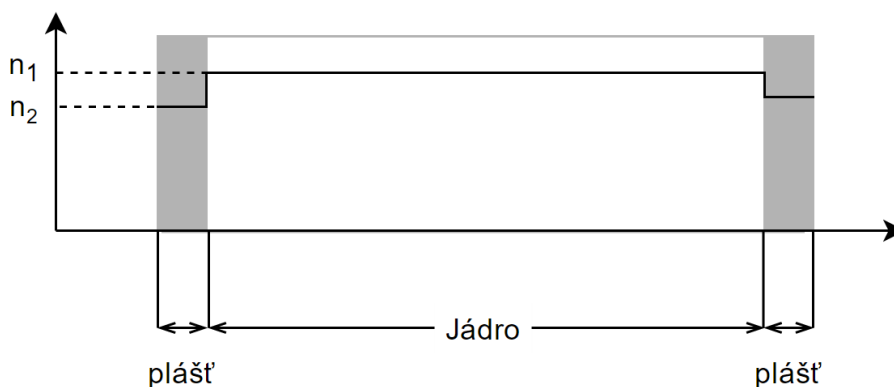
Stejně jako u křemíkových vláken, tak i u plastových vláken bylo první vlákno se skokovou změnou indexu lomu SI-POF. Vlákno tvoří jádro o průměru 980 μm s indexem lomu 1,492 a plášť o tloušťce 10 μm s indexem lomu 1,412. Díky většímu indexu lomu na rozhraní materiálu se numerická apertura vlákna pohybuje okolo hodnoty 0,5. Do vlákna s tak velkou numerickou aperturou se lépe navazují vidy, ale za cenu větší vidové disperze, tím pádem i nižší přenosová rychlost. Šířka pásma u těchto vláken bývá okolo 40 MHz na 100 m délky a útlum přibližně 60 dB/km. Využití nachází u přenosu dat v automobilech, průmyslu a domácích sítích. [3][5]



Obrázek 1.7: Profil indexu lomu SI-POF

### 1.3.2 Low-NA-POF

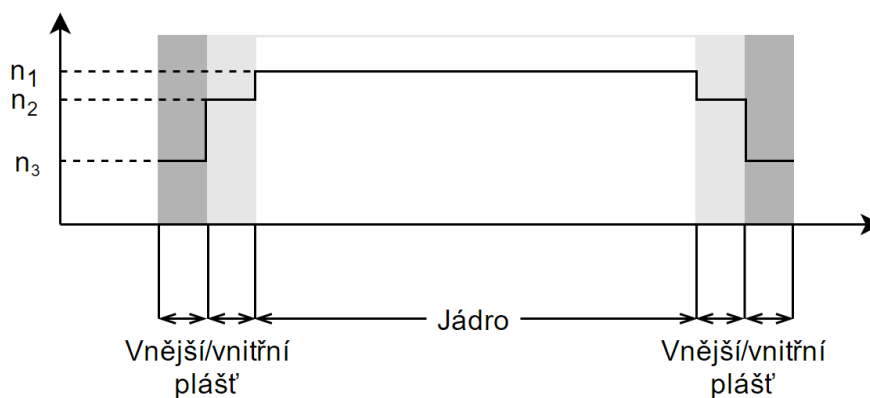
V polovině 90. let minulého století nastala potřeba výměny stávajícího metalického vedení za polymerové optické kabely pro vysokorychlostní přenos ATM (155 Mbit/s). Z toho důvodu bylo vyvinuto polymerové vlákno se sníženou numerickou aperturou, konkrétně o hodnotě 0,3, pro dosažení větší šířky pásma. Šířka pásma narostla z dosavadních 40 MHz na 100 MHz při 100 m délce vlákna. Přestože polymerové vlákno se sníženou hodnotou numerické apertury splňovalo požadavek na šířku pásma, tak nesplňovalo podmínku na útlum, protože bylo citlivější na mechanické ohyby.[5]



Obrázek 1.8: *Profil indexu lomu Low-NA-POF*

### 1.3.3 DSI-POF

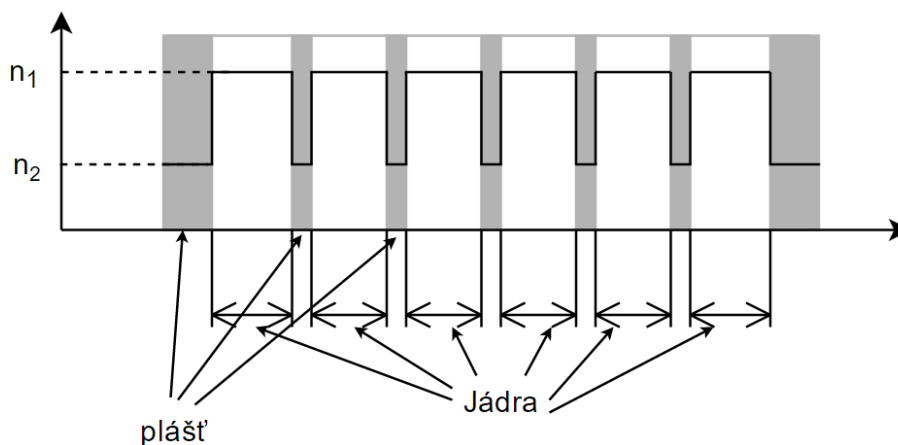
U polymerového vlákna s dvojitou skokovou změnou indexu lomu obklopovalo jádro vlákna dva pláště, vnější a vnitřní. Způsob jakým je světlo vedeno přes vlákno, závisí na poloměru ohybu vlákna. V případě vedení instalovaného v rovině se světlo láme na rozhraní mezi jádrem a vnitřním pláštěm a je vedeno přes jádro vlákna. V druhém případě se světlo láme na rozhraní mezi vnějším a vnitřním pláštěm, pokud u vlákna dochází k ohybům, a je vedeno v vnitřním pláštěm. Tento princip řeší problém s ohybovými ztrátami, které docházely u vláken se sníženou numerickou aperturou. Problém, zde nastává ve vedení světla vnitřním pláštěm, jelikož plášť má vyšší útlum než jádro vlákna. Při přenosech na dlouhých trasách dochází k výraznému nárůstu útlumu a disperze. DSI-POF má hodnotu numerické apertury rovno 0,3 a šířka pásma je 100 MHz na 100m.[5]



Obrázek 1.9: *Profil indexu lomu DSI-POF*

### 1.3.4 MC-SI-POF

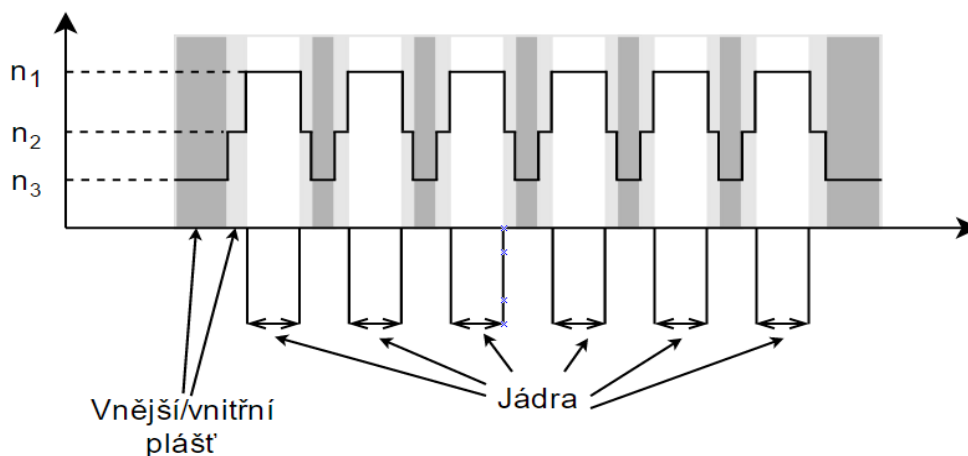
Jedná se o vícejádrové optické vlákno, kde jsou jednotlivé jádra poskládaná tak, aby tvořila kruhový průřez o průměru 1 mm. Každé jádro má svůj plášť o tloušťce  $5\ \mu\text{m}$  a jejich počet ve vlákně se pohybuje od 19 do 200. Výhodou je snížená citlivost na mechanické ohyby, ale na druhou stranu se zvyšuje složitost navázání vidů do vlákna.[3][5]



Obrázek 1.10: *Profil indexu lomu MC-SI-POF*

### 1.3.5 DSI-MC-POF

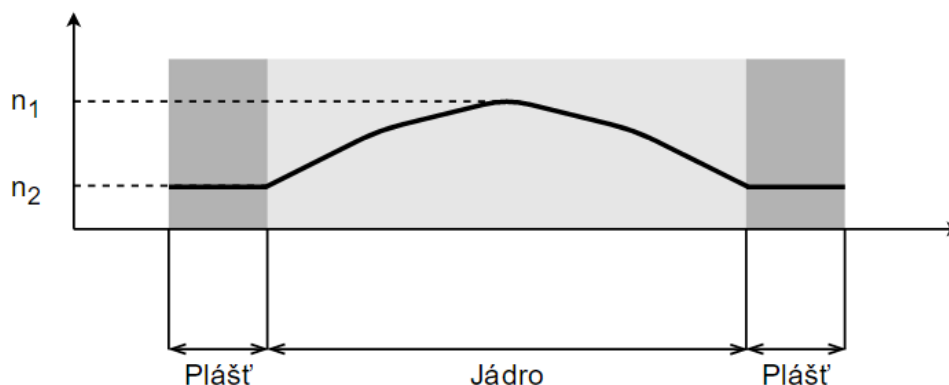
Obdobně jako u MC-SI-POF se jedná o vícejádrové optické vlákno. Zvýšení šířky pásma je zde dosaženo zmenšením rozdílů mezi indexy lomu. Průměr jednotlivých jader se také zmenšil, čímž se zachovala snížená citlivost na mechanické ohyby. Dalším vylepším je použití stejného principu dvou plášťů jako u DSI-POF.[5]



Obrázek 1.11: *Profil indexu lomu DSI-MC-POF*

### 1.3.6 GI-POF

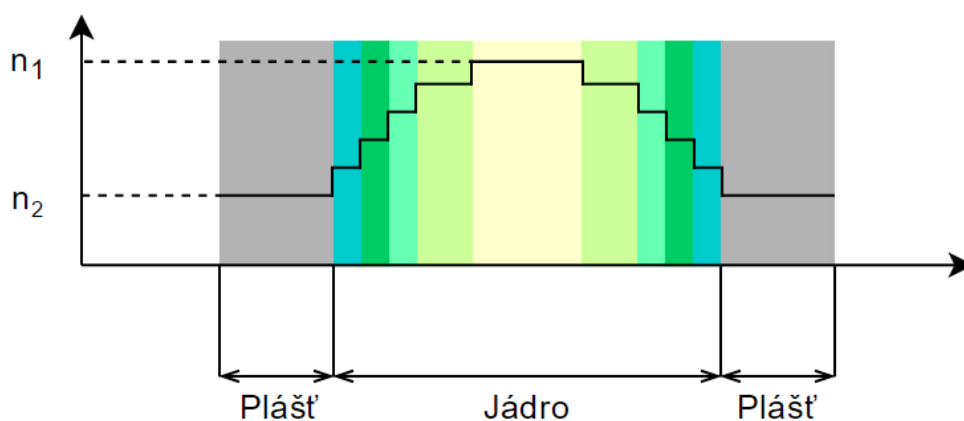
Použitím POF s gradientním (proměnným) indexem lomu lze dosáhnout výrazně větší šířky pásma. Vzhledem k neustále měnícímu se indexu lomu se paprsky nešíří v přímém směru, ale neustále se vracejí parabolicky nebo kruhově k ose jádra. Paprsky jsou navázány do vlákna jeho středem a šíří se přes něj bez jakéhokoliv odrazu. Obecně platí, čím dál jsou paprsky od jádra, tím vyšší mají rychlost šíření. Největší výhodou těchto vláken je zvýšení šířky pásma až na 2 GHz a snížení vidové disperze.[3][5]



Obrázek 1.12: *Profil indexu lomu GI-POF*

### 1.3.7 MSI-POF

Z důvodu mnoha technologických problémů při výrobě GI-POF bylo cílem vytvořit nové vlákno s podobnými parametry, ale při zjednodušení výrobního procesu. Výsledkem je vlákno skládající se z mnoha vrstev (typicky 4 až 7), ve kterých se světlo šíří za pomoci odrazů mezi jednotlivými vrstvami. Tato vícevrstvá struktura umožňuje MSI-POF dostatečně se přiblížit podobnému principu jako je u GI-POF. Hodnota numerické apertury se pohybuje v rozmezí 0,25-0,30 a šířka pásma dosahuje 500 MHz na 100m.[3][5]



Obrázek 1.13: *Profil indexu lomu MSI-POF*

## 1.4 Útlum a disperze na optických vláknech

Ztráty optického výkonu v optické trase jsou způsobeny pasivními prvky, jako je např. optické vlákno, svar nebo konektorové spojení. Útlum ( $A$ ) je jeden ze základních parametrů, který nám určuje míru snížení výkonu optického signálu. Pro jeho vyjádření se používá jednotka decibel [dB]. Jedná se o kmitočtově závislou veličinu a je popsána jako logaritmický podíl vstupního výkonu ( $P_1$ ) a výstupního výkonu ( $P_2$ ) optického signálu.[2][6]

$$A = 10 \cdot \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.2)$$

V praxi se spíše setkáváme s měrným útlumem ( $a$ ) [dB/km], který nám vyjadřuje útlum vztažený na jednotku délky. Získáme jej, když útlum ( $A$ ) podělíme celkovou délkou vlákna ( $l$ ).[2]

$$a = \frac{A}{l} = \frac{1}{l} \cdot 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.3)$$

Útlum i měrný útlum představují nejdůležitější přenosové parametry každé optické trasy. V praxi je většinou vyžadováno, aby útlum celkové trasy byl co nejmenší, což klade vysoké nároky na technologii přípravy vláken a na čistotu použitých materiálů.

Na samotném optickém vlákne rozlišujeme další fyzikální jevy, které nám způsobují útlum. Patří mezi ně:

- Materiálová absorpce
- Lineární rozptyl
- Nelineární rozptyl
- Ohyby vlákna

### 1.4.1 Materiálová absorpce

Jedná se o jev, kdy dochází k průběžnému pohlcování fotonu atomy materiálu jádra. Při tomto jevu dochází ke změně elektromagnetické energie na energii tepelnou. Absorpci dělíme na vlastní a nevlastní.[6]

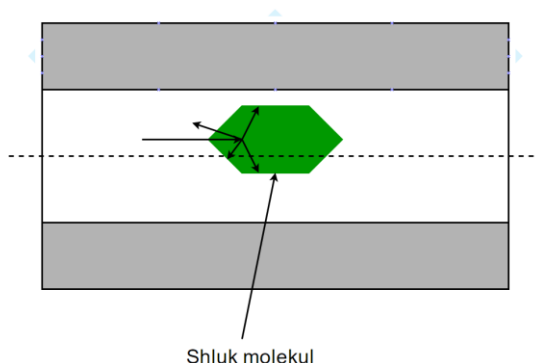
Vlastní absorpce je útlum na molekulách materiálu optického vlákna. Vzniká ovlivňováním procházejícího paprsku molekulami materiálu vlákna a je závislý na vlnové délce paprsku. Projevuje se v infračervené oblasti a ultrafialové oblasti. V infračervené oblasti absorpce stoupá s rostoucí vlnovou délkou, tím omezuje použití vláken nad 1700 nm, naopak v ultrafialové oblasti absorpce klesá s rostoucí vlnovou délkou.[7]

Nevlastní absorpce je způsobená nečistotami v optickém vlákne, které vznikly při výrobě. Největší podíl na nevlastní absorpci mají na svědomí vodní ionty (OH). Absorpce OH zasahuje na vlnových délkách 1240 nm a 1385 nm, které jsou součástí tzv. přenosových oken. Vodní ionty také narušují strukturu vlákna, tím že vytváří v materiálu mikrotrhliny. Kvůli těmto mikrotrhlinám je vlákno náchylné na praskání.[7][8]

### 1.4.2 Lineární rozptyl

Tento rozptyl vzniká při ne zcela přesnému a rovnoměrnému oddělení jádra a obalu. U tohoto rozptylu nedochází ke změně vlnové délky přenášeného paprsku. Podle velikosti nečistot ve vlákne rozlišujeme lineární rozptyl na Rayleighův a Mieův. [7]

Rayleighův rozptyl je způsoben nehomogenitou (nerovnoměrné) rozložení molekul v materiálu. Jedná se o tzv. shluky molekul, na kterých dochází k rozptylu optického záření do všech směrů. Tento rozptyl nelze eliminovat při výrobě, protože se jedná o nedokonalost použité technologie.[7]



Obrázek 1.14: Rayleighův rozptyl

Mieův rozptyl dochází na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou záření. Je způsoben geometrickými odchylkami, mikroskopickými bublinkami, nečistotami ve vlákne a dalšími nedokonalostmi. Na rozdíl od Rayleighova rozptylu jej lze minimalizovat nanášením ochranných vrstev, pečlivým tažením optického vlákna, zvýšením indexů lomu rozhraní jádra a pláště.[7]

### 1.4.3 Nelineární rozptyl

Jde o fyzikální jev, kdy dochází ke vzniku nových fotonů po střetu s atomy a molekulami materiálu. Nově vzniklé fotony mají však nižší frekvenci než původní a jsou na přijímací straně filtrovány, což se projevuje jako ztráta.[6]

Brillouinův rozptyl patří mezi základní typy nelineárních rozptylů. Vysoká intenzita záření způsobuje vznik akustické vlny, která se šíří vláknem a následně se od ní záření odráží. Odrazem nově vzniklé záření se liší od původního o několik GHz.[9]

Ramanův rozptyl je další základní typ nelineárního rozptylu, u něhož dochází primárně k interakci fotonu s kmitajícími atomy nebo molekulami materiálu. Zde také dochází k posunutí záření, většinou jde o několik THz.[9]

### 1.4.4 Ohybové ztráty

Ohyby působí většinou na vlákno negativním způsobem a snažíme se je eliminovat už při výrobě vlákna nebo při pokládání. Při ohybu vlákna vzniká na vnitřní straně ohybu tlak a na vnější straně tahové napětí. Tím dochází ke změně indexů lomu v jádře a pláště a následně i ke změně mezního úhlu. Ohyby dělíme na mikroohyby a makroohyby.[8]



Mikroohyby vznikají při výrobě vlákna nebo působením vnějších vlivů. U výroby může docházet ke vzniku ohyby při tažení vlákna, nanášení ochrany, kabelování nebo navíjení na cívku. Do vnějších vlivů můžeme zařadit změnu teploty, mechanické pnutí, nerovnoměrný tlak po délce vlákna a vysoký tah. Jedná se o malé chyby v geometrii vlákna. Důsledkem je porušení podmínky totálního odrazu a následné vyzáření energie paprsku do pláště. Mikroohyby se vyskytují náhodně po celé délce optického vlákna a výrazně přispívají k jeho celkovému útlumu.[10]

Makroohyby vznikají manipulací s optickým vláknem při pokládání do trasy nebo spojování. Při instalaci vlákna do trasy je třeba dbát na minimální poloměr ohybu optického vlákna, typicky se uvádí 60mm, který se nesmí překročit. Je-li tato mez překročena, dochází k vyzáření části energie paprsku ven z jádra. Velikost útlumu je dána zvolenou vlnovou délkou. Obecně platí, že s vyšší vlnovou délkou roste i útlum vlákna.[10]

### 1.4.5 Disperze

Disperze je jev, který způsobuje zkreslení přenášeného signálu optickým vláknem, tak že ho rozšiřuje a tím omezuje přenosovou rychlost. Je způsobena různými dráhami šíření každého vidu a různou rychlostí šíření ve vlákne. Je definována jako rozdíl šířky impulzu na konci a na začátku optického vlákna. U disperze rozlišujeme vidovou, polarizační vidovou a chromatickou disperzi.[10]

Vidová disperze se vyskytuje pouze u mnohovidových vláken. Je způsobena různými dráhami šíření jednotlivých vidů. V důsledku dochází k rozšíření optického signálu, protože na konec vlákna dorazí vidy v různých časových okamžicích. Vidová disperze je hodnotově nejvyšší u mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu, lze ji eliminovat vyrovnaním rychlosti šíření jednotlivých vidů vhodným profilem indexu lomu ve vlákne. K tomu nám slouží mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu, u nějž je vidová disperze řádově 1000x menší.[10]

Polarizační vidová disperze je jev, kdy se jeden vid šíří ve dvou na sobě kolmých polarizačních rovinách vertikální a horizontální, což způsobuje časové rozšíření impulzu a tím zkreslení signálu. Tato disperze se vyskytuje pouze u jednovidových vláken a nelze nijak eliminovat, jediná možnost je výroba optického vlákna s malou garantovanou hodnotou polarizační vidové disperze.[10]

Chromatická disperze je způsobena zdrojem optického záření. V praxi není možné sestavit ideální zdroj, a proto každý reálný zdroj optického záření vyzařuje vždy určité spektrum vlnových délek najednou. Na výstup pak dorazí jednotlivé složky spektra v různý časový okamžik. Tím dochází k roztažení přenášeného signálu a ten tak může zasahovat do vedlejších bitových mezer. Chromatická disperze má tři složky. První z nich je materiálová složka, která vzniká při výrobě optického vlákna a je dána závislostí indexu lomu použitého materiálu na vlnové délce optického záření. Druhá složka se nazývá vlnovodová a vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Poslední profilová složka je způsobena závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření.[3]

## 2 Polydimethylsiloxan

### 2.1 Úvod

Polydimethylsiloxan (PDMS) ze skupiny polymerních organokřemičitých sloučin, známý taky jako silikon, je nejrozšířenější organický polymer obsahující křemík. Specifickou vlastností těchto silikonů je malá závislost jejich fyzikálních vlastností na teplotě. Dokáží dlouhodobě snášet teploty do 200 °C, krátkodobě až 350 °C. Mezi další vlastnosti bychom mohli zařadit nehořlavost, netoxický a optická čistota. Díky těmto vlastnostem nachází hojně uplatnění v různých odvětvích průmyslu. [3][11]

Z mechanického hlediska je polydimethylsiloxan viskoelastický. Při ponechání PDMS po dlouhou dobu okolním vlivům nebo zahřátím se chová jako kapalina, přirovnatelná medu. Naopak při krátkodobém vystavení okolnímu prostředí nebo při nízké teplotě se chová jako elastická hmota, ne nepodobná gumě.[12]

Z chemického hlediska se jedná o inertní látku, která je bez zápachu a chutí, nezpůsobuje korozi jiným materiálům, odolává ozónu a představuje prostředí nevhodné pro bakterie. Také patří mezi nejméně toxické polymery a je tedy, z ohledem na životné prostředí, bezpečný na použití. Při výrobě je však nutné dbát na bezpečnostní předpisy, jelikož jsou zde využívány kyseliny.[13]

### 2.2 Využití PDMS v praxi

Jak už bylo zmíněno výše, díky různým vlastnostem, polydimethylsiloxan v dnešní době nachází mnoho využití v nejrůznějších odvětvích průmyslu. To se pohybuje od kosmetického průmyslu až po výrobu mikrofluidních čipů.

V kabelářském, strojírenském nebo automobilovém průmyslu se používá k izolaci tepelně namáhaných vodičů. V lékařství jej můžeme najít v různých biomedicínských zařízeních nebo také, díky jeho biokompatibilitě, v prsních implantátech. Při výrobě prsních implantátů se používá nejen jako vyplňující tekutina, ale i jako schránka pojímající tuto tekutinu. Dále se využívá v potravinářství na výrobu dimethylsilikonového oleje E900, který slouží jako přípravek proti tvorbě pěny například při výrobě vína nebo sirupů. Využití polydimethylsiloxanu v praxi je velmi rozšířené a dále se testují nové možnosti tohoto materiálu. Následující seznam představuje některé z dalších využití: [3][14]

- Separční prostředky, lepidla
- Tmely a těsnění
- Zapouzdření elektrických součástek
- Maziva, fixační olej
- Teplo vodivé kapaliny, hydraulické kapaliny
- Kontaktní čočky, průhledné baterie
- Vlasová kosmetika

## 2.3 Sylgard

Jedná se o elastomer na bázi polydimethylsiloxanu, který se dodává v jednosložkovém nebo dvousložkovém gelu. Na vytvrzení je potřeba použít vytvrzovací činidlo, které dopomáhá gelu vytvrdnout za zvýšené nebo pokojové teploty. Sylgard disponuje velmi dobrými vlastnostmi, mezi něž patří například velký pracovní rozsah teplot, odolnost proti vlhkosti a mnoho dalších, díky těmto vlastnostem jej lze využít na různé účely.[3]

### 2.3.1 Sylgard 160

Sylgard 160 je silikon, který byl speciálně navržen pro zapouzdřování součástek, kde je důležitý přenos tepla. Dodává se ve dvousložkovém provedení, které se míchá hmotnostně nebo objemově v poměru 1:1. Jeho pružná povaha jej přizpůsobuje velkým změnám teplot bez zatěžování citlivých součástek vysokým mechanickým napětím.[15]

### 2.3.2 Sylgard 170

Tento silikon se dodává ve dvou tekutinách v poměru 1:1. Po smíchání těchto dvou tekutin lze nechat směs vytvrdnout při pokojové teplotě nebo při lehkém zahřátí směsi. Směs po vytvrzení tvoří silikon, který je velice spolehlivý, odolný a snadno opravitelný. Jeho pracovní rozsah teplot se pohybuje od -45 °C do 200 °C. Díky jeho výborným elektrickým vlastnostem nachází široké uplatnění v elektronice na zalévání a zapouzdřování elektrických zdrojů, konektorů, senzorů, transformátorů, zesilovačů a mnoho dalších prvků.[13][16]

### 2.3.3 Sylgard 182 a 184

Oba dva silikonky se dodávají ve dvou tekutinách v poměru 10:1. Hlavní rozdíl mezi sylgard 182 a sylgard 184 je v jejich procesu vytvrzování. Vytvrzovací proces u Sylgard 182 probíhá za zvýšené teploty, zatímco u Sylgard 184 můžeme vytvrzovat už při pokojové teplotě. U obou silikonů může být vytvrzení zkráceno zvýšením teploty maximálně do 150 °C. Pracovní rozsah teplot se u obou silikonů pohybuje od -55 °C až do 200 °C. Mezi jejich vlastnosti můžeme zařadit dobrou fyzikální a elektrickou stabilitu v širokém rozsahu frekvencí a vlhkosti. Dále poskytují ochranu proti vnějšímu prostředí, mechanickému poškození a disponují zvýšenou odolností proti radiaci. Stejně jako u Sylgard 170 jsou snadno opravitelné a uplatňují se v elektronice jako zapouzdřovací přípravky, které poskytují pružnou ochranu pro moduly, relé, zdroje proudu, zesilovače, transformátory, feritová jádra, vinutí a konektory. Jejich využití nezůstává pouze v elektronice, ale lze jich využít i při zapouzdřování solárních článků nebo u 3D tisku na výrobu tiskové základny.[13][17]

### 2.3.4 Sylgard 517

Stejně, jako u výše zmíněných silikonů, se Sylgard 517 dodává ve dvousložkovém provedení v poměru 1:1. Proces vytvrzování probíhá za pokojové nebo zvýšené teploty do formy samosezaceľujícího gelu. Gel má dobrou odolnost vůči teplotním změnám, dokáže tlumit mechanické rázy a vibrace a i za normálního tlaku teče a zatéká pod drobné elektronické součástky. Tyto vlastnosti si zachovává i při dlouhodobém vystavení nízkých či vysokých teplot. Jeho pracovní rozsah teplot se pohybuje mezi -50 °C až 200 °C. Použití je vhodné především pro elektroniku, kde se vyžaduje dlouhotrvající těsnící efekt proti vlhkosti a dalším vlivům.[13][18]

## 2.4 Vlastnosti Sylgardu

V následující podkapitole se nachází souhrn mechanických a elektrických vlastností Sylgardu 182 a 184, jelikož se pro výrobu optického vlnovodu jeví jako nejvhodnější volbou z výše uvedených silikonu.

Typické vlastnosti	Sylgard 182	Sylgard 184
Viskozita při 25 °C, [mPas]	5500	5500
Viskozita po přidání vytvrzovacího činidla, [mPas]	4000	4000
Směšovací poměr	10:1	10:1
Barva	čirá	čirá
<b>Mechanické vlastnosti</b>		
Tvrdost, [Shore A]	40	40
Mez pevnosti v tahu, [MPa]	6,2	6,2
Pevnost v roztržení, [kN/m]	2,7	2,7
Tepelná vodivost, [W/m·K]	0,146	0,146
Bod lámavosti, [°C]	< -70	< -70
<b>Elektrické vlastnosti</b>		
Dielektrická pevnost E, [kV/mm]	19	14
Relativní permitivita $\epsilon$ , 100 Hz	2,65	2,72
Relativní permitivita $\epsilon$ , 100 kHz	2,65	2,68
Rezistivita $\zeta$ , [W·cm]	1,60E+15	2,9E+14

Tabulka 2.1: *Souhrn vlastností Sylgardu 182 a 184*

Tvrdost Shore se měří tzv. duometrem. Stupnice tvrdosti Shore A se pohybuje od hodnoty 0 až po 100, kde 0 představuje měkké materiály a 100 tvrdé materiály. Oba Sylgardy 182 a 184 jsou na této stupnici těsně pod polovinou stupnice, čímž je můžeme přirovnat k tvrdosti těsnící gumy. Dále z výše uvedené tabulky stojí za povšimnutí vysoká rezistivita u obou typu silikonu, která je činí velmi dobrými izolanty.[3]

### 3 Metody měření útlumu

Měření útlumu patří k nejzákladnějším v měření v optoelektronice. V současnosti měření na optických trasách představuje velmi důležitý nástroj pro jejich údržbu a zajištění spolehlivosti provozu. Průběžné kontrolní měření se provádí už při montáži optické trasy, kdy je možné odhalit různé nedokonalosti nebo lokalizovat poruchy, které by nám zhoršili přenosové parametry trasy. [19]

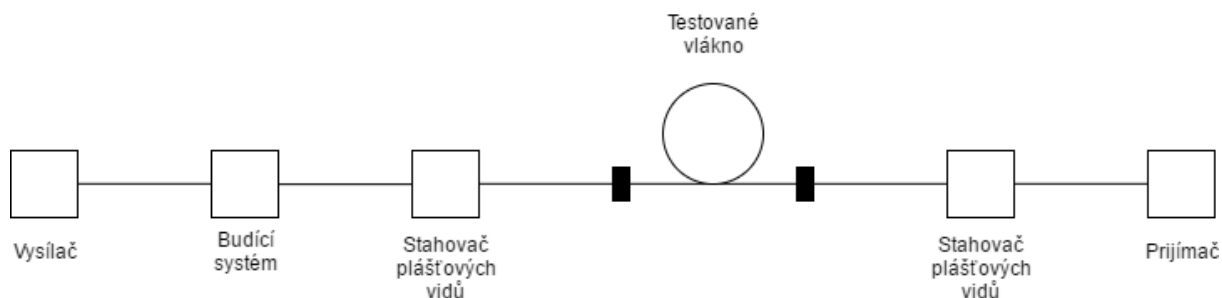
Jako detektory se většinou používají fotodiody s vysokou citlivostí, tak aby zachytili veškeré záření, které vystupuje z vlákna. Citlivost u fotodiód je spektrálně závislá, z tohoto důvodu je nutné nastavit měřič optického výkonu na vlnovou délku použitého zdroje záření. Při měření je nutné zajistit, aby výstup vlákna byl souosý vůči detektoru záření.

V praxi se při měření útlumu rozlišují tři standardní metody. Z těchto tří metod jsou dvě transmisní a jedna reflexní. Transmisní metoda využívá stabilizovaného zdroje záření a měřiče optického výkonu. U této metody měříme skutečné zeslabování signálu po průchodu vláknem. Reflexní metoda je založená na měření zpětného rozptylu optickým refraktometrem. Metoda dvou délek a metoda vložných ztrát jsou první dvě metody, které patří mezi transmisní. Třetí metoda OTDR patří mezi metodu reflexní.[19]

#### 3.1 Metoda dvou délek

Ze všech tří metod je metoda dvou délek považována za nejpřesnější pro měření útlumu, a proto je doporučována jako referenční. Nevýhodou této metody je nemožnost měřit hladinu útlumu v konkrétních bodech trasy a nutnost lámaní vlákna při měření. [20]

V prvním kroku měření se naváže zdroj optického záření do testovaného optického vlákna o délce  $l$  a změří se výstupní výkon  $P_2$  signálu po průchodu vláknem. V následujícím kroku se provede destruktivní část metody, kdy se na začátku vlákna zlomí přibližně 2 m z délky a pomocí detektoru se změří vstupní výkon  $P_1$ . Během měření v obou krocích by měli být zachovány stejné podmínky. Ze získaných hodnot vstupního a výstupního výkonu se spočítá celkový útlum trasy pomocí rovnice 1.2. [20]

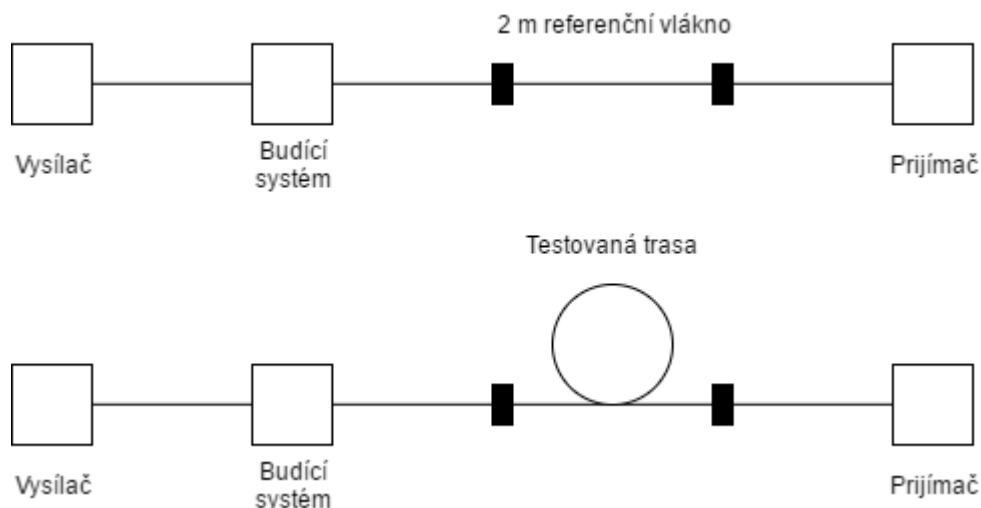


Obrázek 3.1: Metoda dvou délek

### 3.2 Metoda vložných ztrát

Metoda vložných ztrát je druhá z transmisních metod, která je principem velice podobná metodě dvou délek, ale na rozdíl od ní nedochází k lámání optického vlákna. Tato metoda se využívá především v případech, kde není možné použít destruktivní metodu dvou délek.[19][20]

Měření probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se změří vstupní výkon  $P_1$  na 2 m dlouhém optickém vlákně, který slouží jako reference. Měření probíhá stejně jako u metody dvou délek za pomoci optického zdroje záření a měřičem optického výkonu. V druhém kroku se referenční vlákno nahradí testovanou trasou a změří se výstupní výkon  $P_2$ . Oproti metodě dvou délek není tato metoda tak přesná, jelikož se u ní předpokládá, že ztráty na vlákně referenčním a měřeném jsou stejné, čehož nelze prakticky dosáhnout. Z tohoto důvodu je nutné použít referenční vlákno s parametry co nejpodobnějšími měřenému vlákně.[19][20]



Obrázek 3.2: Metoda vložných ztrát

### 3.3 Metoda zpětného rozptylu - OTDR

V praxi je vyžadováno, aby optické vlákno bylo homogenní a mělo nejlepší možné vlastnosti na vedení světla. Těchto podmínek nelze vždy dosáhnout, a proto dochází k odrazům a v optickém vlákně se šíří kromě postupné vlny ještě odražená vlna, která se šíří opačným směrem. Důsledkem těchto odražených vln je zhoršená kvalita přenosu a celkově zvýšený útlum celé trasy. Proto musí být každá optická trasa testována a kontrolována jednou z měřících metod, aby se dosáhlo co nejmenšího útlumu.[19][20]

Metoda OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) je třetí standardní metoda, která se řadí do metod reflexních. Její princip je založen na vyhodnocování časové prodlevy zpětného rozptýleného optického výkonu při šíření úzkého optického impulsu měřeným vláknem. Tato metoda je schopná, na rozdíl od výše zmíněných metod, poskytnout informace o prostorovém uspořádání ztrát, což je velice užitečné pro lokalizaci chyb na trase.[19][20]

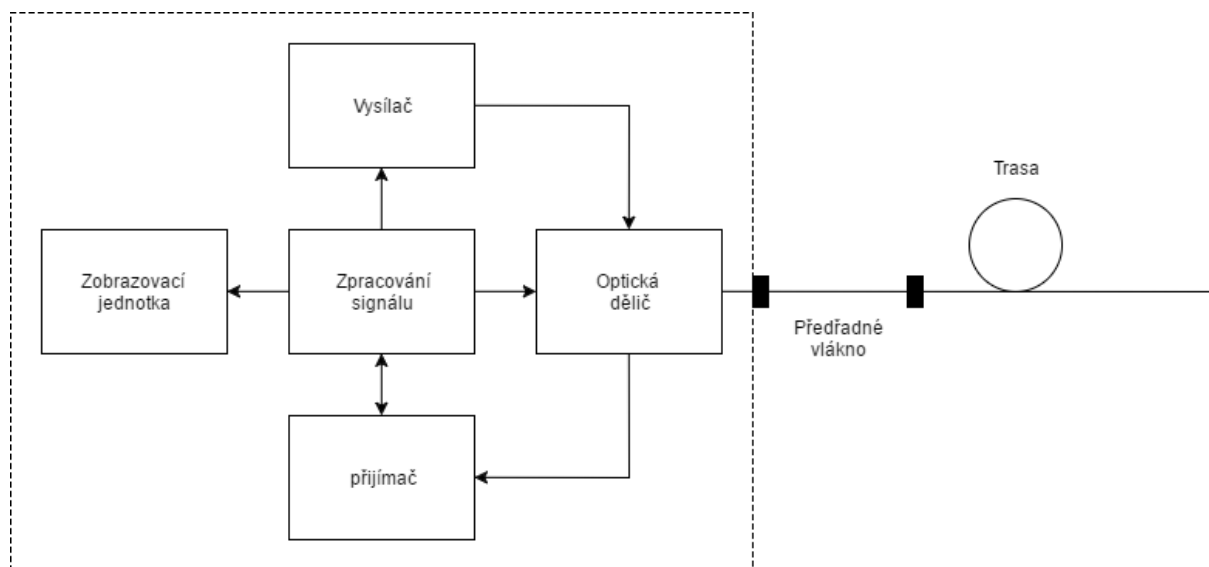
Princip metody spočívá ve využití dvou odrazů k lokalizaci míst způsobující útlum na trase. V případě útlumu optického vlákna se využívá Rayleighová rozptylu, který se skládá z rozptylů způsobených na nehomogenitách podél celého vlákna. Tyto zpětně odrážené vlny se vrací zpátky do měřicího zařízení OTDR, kde se vyhodnotí výsledky. Za pomoci Fresnelova odrazu jsme schopni určit polohu a útlum konektorů, použitých svarů, porušení či přerušení vlákna. Tyto útlumy jsou způsobeny jednotlivými složkami ve vlákne a náhlými změnami indexu lomu. V případě Fresnelova odrazu je velké množství vyzářeného světla odráženo zpět na začátek, díky čemuž jsme schopni určit polohu těchto útlumů. Odstranění Fresnelova odrazu není zcela možné a korektní měření je možné provádět až od určité vzdálenosti od počátku vlákna. Tato vzdálenost se pohybuje v jednotkách až desítkách metrů a je označovaná, jako mrtvá zóna (dead zone). Pro eliminaci této mrtvé zóny se využívá předřadného vlákna, které umožňuje provádět měření od prvních centimetrů. V souvislosti s dalšími odrazovými poruchami se rozlišuje ještě jedna mrtvá zóna, indikující minimální vzdálenost mezi dvěma odraznými poruchami, při které lze poruchu bezpečně rozlišit.[19][20]

### 3.3.1 Přístroj OTDR

Další z výhod OTDR metody je v jeho přístroji. OTDR přístroj v sobě obsahuje optický detektor, vysílač a přijímač, díky čemuž je dostačující měřit pouze na jednom konci trasy.[19]

Zdroj optického záření bývá zpravidla laser, který umožňuje vysílat úzké pulzy světla řádově desítky až stovky nanosekund s opakovací frekvencí několik kHz, což u LED diod není možné. Volená šířka pulzů je závislá na délce měřené trasy, platí čím je delší trasa, tím jsou potřeba delší pulzy. S tím přichází nevýhoda OTDR, kdy se snižuje citlivost detekce s narůstající délkou pulzů.[19]

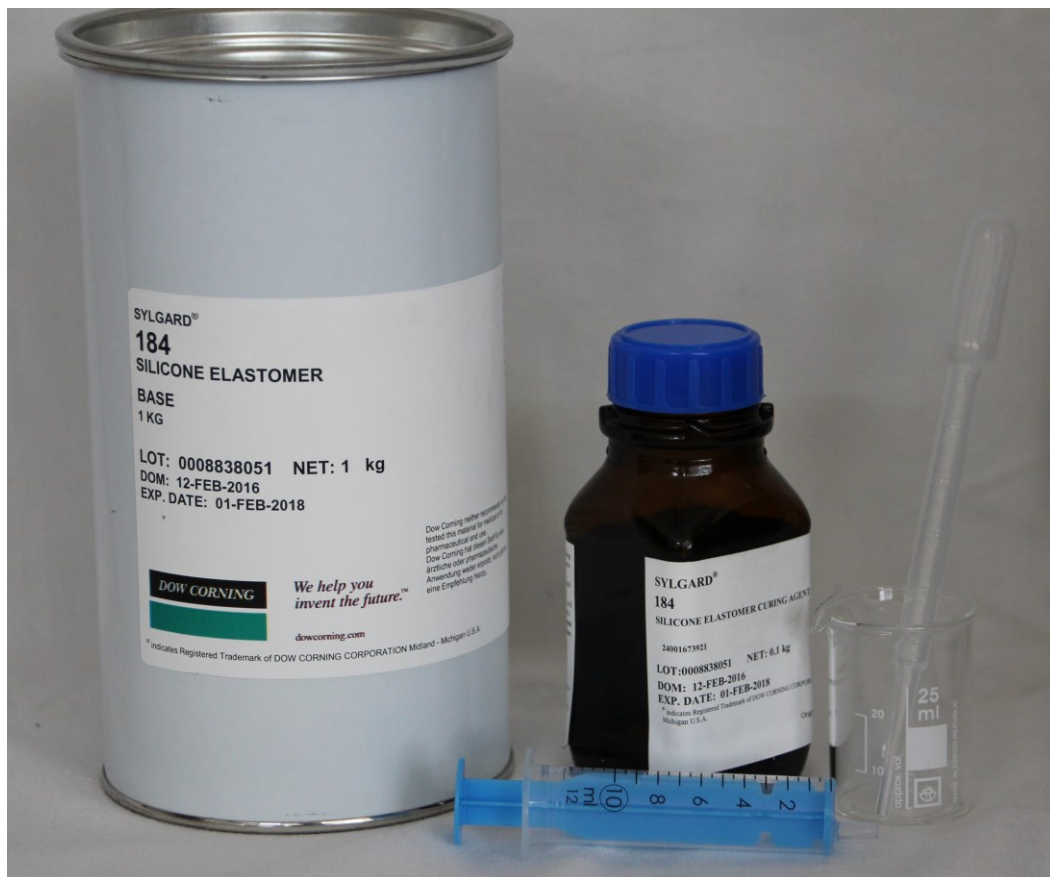
Detektor OTDR přístroje typický tvoří lavinová fotodioda, která nabízí větší citlivost a zisk než PIN diody používané v měřicích velkých výkonů. Detektor musí být dostatečně citlivý, aby byl schopen zachytit zpětně odrážené vlny, a zároveň musí být schopen odolat jakkoli velkému Fresnelovu odrazu. OTDR detektor měří úroveň výkonu světla vracejícího se z vlákna a převádí tyto informace do elektrické podoby.[19]



Obrázek 3.3: *Blokové schéma OTDR přístroje*

## 4 Výroba optického vlnovodů s různými poměry tvrdidla

Prvním úkolem v praktické části byla výroba optických vlnovodů z polydimethylsiloxanu. Na výrobu optických vlnovodů jsem si zvolil Sylgard 184 od firmy Dow Corning, který se jevil jako nejvhodnější k účelu této práce. Pro optimální vytvrzení je výrobcem doporučeno míchat dodávaný silikon s tvrdidlem v poměru 10:1. Jelikož účelem této práce je prozkoumat vlastností optických vlnovodů vyrobených s různými poměry tvrdidla, tak bylo do výroby zahrnuto kromě doporučeného poměru 10:1 také další poměry 8:1, 12:1 a 14:1.



Obrázek 4.1: Sylgard 184 s tvrdidlem a pomůcky

### 4.1 Příprava směsi

Silikon Sylgard 184 byl z nádoby nabírán za pomoci injekční stříkačky do připravené kádinky, následně k němu bylo přimícháno tvrdidlo, které se nabíralo plastovou pipetou. Při přípravě směsi bylo nutné dbát, aby se silikon nedostal do nádoby s tvrdidlem a naopak, jelikož by došlo k znehodnocení složek. Z tohoto důvodu nebylo možné nabírat obě složky pouze jedním nástrojem. Po přidání obou složek do kádinky bylo nutné směs rovnoměrně promíchat. Při procesu míchání, které probíhalo manuálně za pomoci pipety nebo injekční stříkačky, začaly vznikat vzduchové bubliny. Z tohoto důvodu bylo nutné směs umístit na pár hodin do lednice, kde se díky chladu urychlil proces odvodu těchto vzniklých bublin, což je způsobeno zvyšující se rozpustností plynů v kapalinách s klesající teplotou.





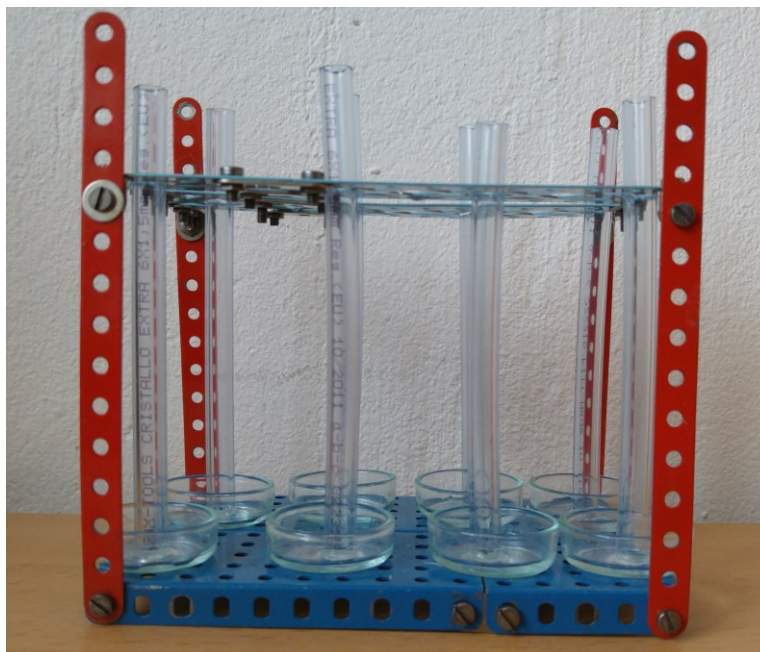
Obrázek 4.2: Vlevo – čerstvě promíchaná směs, vpravo – odstátá směs po 5 hodinách v lednici

## 4.2 Tvorba vlnovodů

Na samotnou výrobu vlnovodů byla použita silikonová hadice o vnitřním průměru 6 mm, která sloužila jako forma pro vlnovody. Jelikož hadice byla kupovaná v délce několika metrů, tak ji bylo nutné rozřezat na menší kusy. Jednotlivé kusy byly nařezané přibližně na délku 13 cm, což byla vyhovující délka na výrobu jednoho 10 cm vlnovodu s rezervou potřebnou na vytažení vlnovodu z formy a na zarovnání obou konců vlnovodu. Předtím než se mohli formy začít plnit, tak bylo nutné je narovnat a z jedné strany utěsnit. K narovnání byla použita kovová trubice nařezaná na délku jednoho kusu silikonové hadice. Do nařezaných částí kovové trubice se poté vložily kusy silikonové hadice a nechaly se v pečicí troubě na 3 min při 80 °C. Po vytažení z trouby bylo vhodné nechat trubice s hadičkami vychladnout, aby se hadičky vytažením nijak nezdeformovaly. Na utěsnění byly použité Petriho misky, na které se nalilo malé množství z namíchané směsi. Následně se na misky se směsí umístily formy v podobě hadiček a po procesu vytvrdnutí směs vytvořila uzávěr. Na takhle vytvořené uzávěry bylo ještě nutné použít podpůrné konstrukce, aby z misek nevypadly umístěné hadičky. Na tuto funkci byla využita stavebnice Merkur, která se výborně hodila pro tento účel. Dále následoval proces vytvrdnutí, který by za normálních pokojových teplot trval příliš dlouho, proto byla celá stavebnice s formami umístěná do pečicí trouby na 1 hodinu při teplotě 80 °C. Tato doba pro vytvoření několika uzávěrů se zdála poměrně dlouhá při množství použité směsi. Při výrobě malého počtu vlnovodů by se tento čas jevil jako zanedbatelný, ale při výrobě většího množství se výrobní proces zbytečně prodlužoval. Z počátku byla doba pečení zkrácena o polovinu, tedy na půl hodiny. Po vytažení z trouby a vychladnutí se uzávěry zdály být totožné s uzávěry pečenými na 1 hodinu. Pro další výrobu byla otestována doba pečení 10 minut a 20 minut. 10 minut byla příliš krátká doba a směs nestihla zcela vytvrdnout. Nakonec se 20 minut ukázalo jako ideální k vytvrdnutí směsi.



Obrázek 4.3: *Silikonová hadička vložená v kovové trubici*



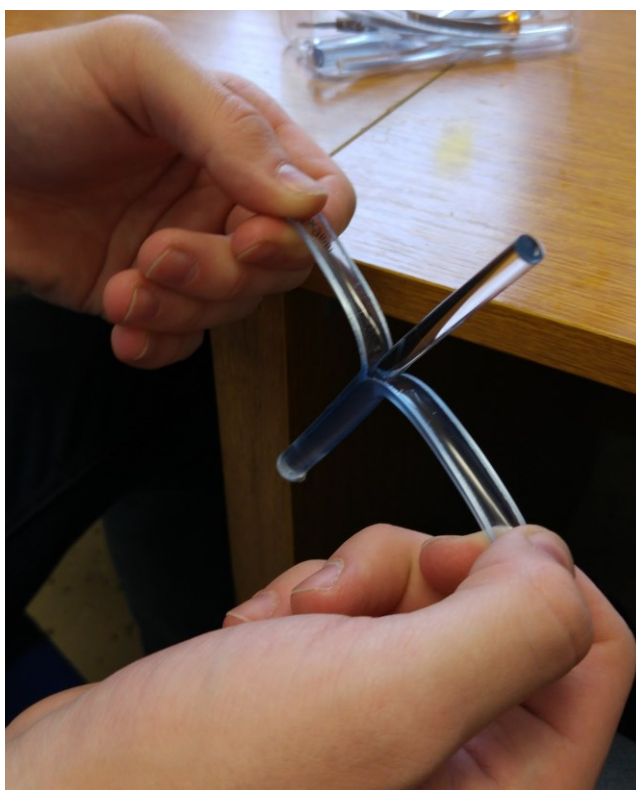
Obrázek 4.4: *Stavebnice Merkur s uzavřenými hadičkami*

Po úspěšném vytvoření uzávěrů bylo možné přejít do fáze plnění forem připravenou směsí. Při plnění se opět tvořily vzduchové bubliny. Tentokrát se naplněné formy nechaly v lednici přes noc. Následně výroba pokračovala zapečením naplněných forem na 2 hodiny při 80 °C, což byla nejvyšší možná teplota při níž si silikonové hadičky udržely svůj původní tvar. Při vyšších teplotách docházelo k jejich deformaci, což způsobilo povolení uzávěru a vznik vzduchových bublin zespoda forem.



Obrázek 4.5: Čistý optický vlnovod a vlnovod se vzduchovými bublinami

Posledním krokem výroby bylo vytažení jednotlivých vlnovodů z forem a zarovnání obou konců. K vytažení byla forma naříznutá podélně ze dvou stran a následně došlo k jejímu rozdělení na dvě poloviny (obr. 4.4). Zarovnání vlnovodů bylo obtížnější, kvůli jeho struktuře a při použití lámacího, kuchyňského či keramického nože docházelo k různému prohýbání vlnovodu, čímž bylo praktický nemožné provést rovný řez. Nakonec byla k zarovnání vlnovodů sestavena konstrukce zobrazena na obrázku 4.5. Konstrukce je postavená z čepele z kobercového nože připevněného na kusu hokejové hole, která je přidělaná k dřevěné desce. Pod čepelí jsou přilepené dva malé kusy kovové trubice, které částečně zamezovaly prohýbání vlnovodu.

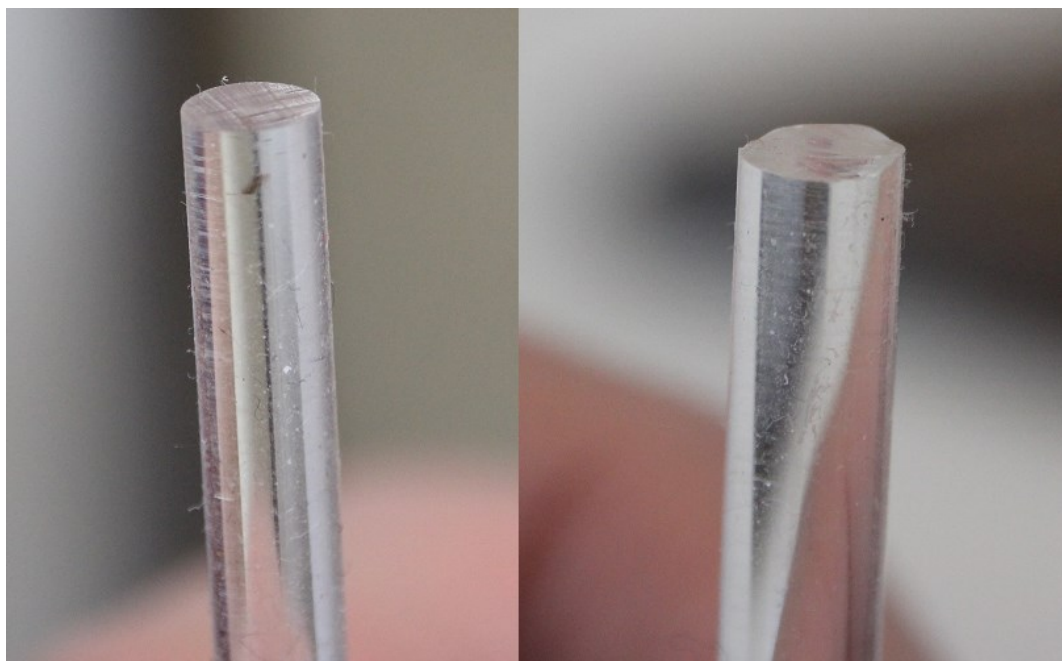


Obrázek 4.6: Oddělení vlnovodu od formy





Obrázek 4.7: *Konstrukce k řezání vlnovodů*



Obrázek 4.8: *Vlevo – řez provedený sestavenou konstrukcí, vpravo – řez provedený keramickým nožem*

## 5 Měřicí pracoviště

K měření útlumů vlnovodů bylo nutné si sestavit měřicí sestavu, která by obsahovala fotodetektor, clonu, plochu k umístění vytvořených vlnovodů a světelný zdroj. K tomuto účelu byla použita stavebnice od firmy Thorlabs, která nabízí velké množství komponentů, které jsou navzájem jednoduše kombinovatelné, což umožňuje poskládat si konstrukci podle potřeb.

V případě měření indexu lomu byl využitý Abbého refraktometr, který všechny potřebné funkce k měření již obsahoval. Jedinou nutností bylo přidat k přístroji zdroj světelného záření.

### 5.1 Měřicí sestava

Cílem bylo zkonstruovat sestavu, která by všechny obsažené komponenty udržela v jedné ose, aby se zachovala jistá míra opakovatelnosti měření. Výsledkem byla vytvořená konstrukce, na které byla připevněna dřevěná deska se světelným zdrojem v podobě LED diody. Tato konstrukce umožňovala pohybovat s LED diodou směrem k fotodetektoru pro změření reference (vstupního výkonu) a zpět za optický vlnovod aniž by se LED dioda vychýlila z osy. Dalším prvkem byla plošina na umístění vlnovodu a za ni clona vytvořená z kusu dřeva, která měla za úkol zakrývat fotodetektor, aby se do něj nedostalo jiné světelné záření než z konce vlnovodu. Celou sestavu zakončoval fotodetektor Thorlabs S121C připojený do powermeteru PM100USB od stejnojmenného výrobce.

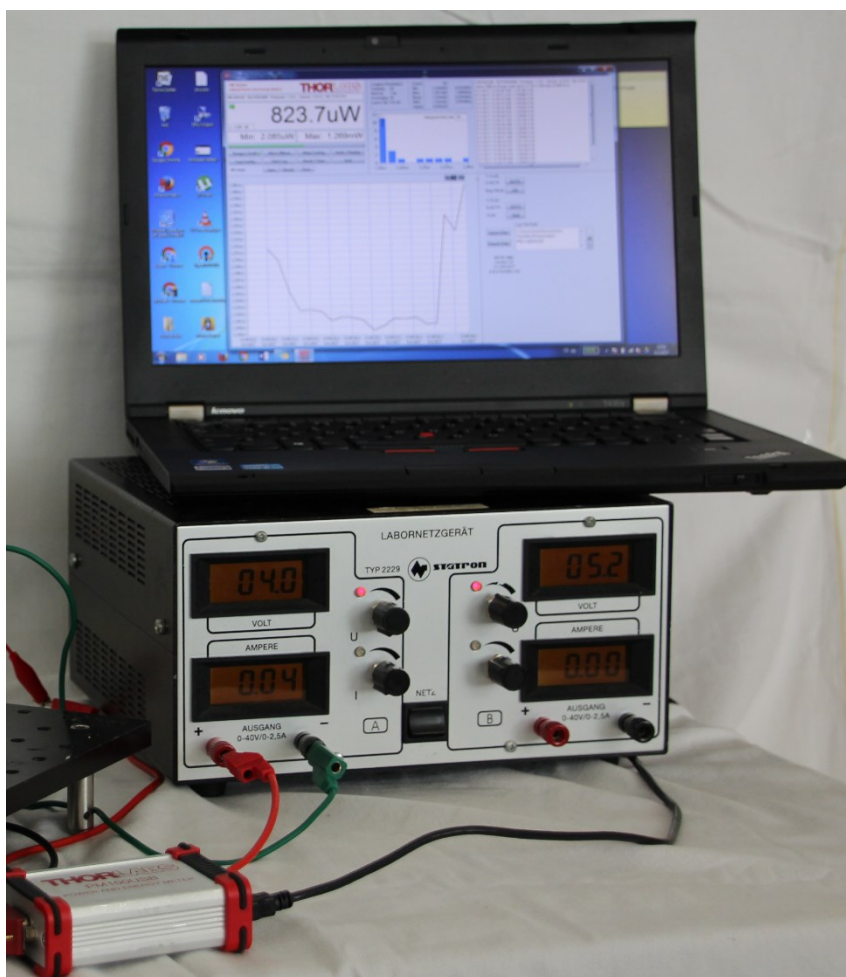


Obrázek 5.1: Měřicí sestava

## 5.2 Měřicí přístroje a zdroj světla

Jak už bylo výše zmíněno, k detekci výkonu byl využit fotodetektor S121C, který umožňoval měřit vlnovou délku v rozsahu od 400-1100 nm a výkon maximálně do 500 mW. Tento fotodetektor byl připojen do powermeteru PM100USB, který se ovládal pomocí softwaru. Kromě těchto dvou přístrojů byl také použit napájecí zdroj Statron Labornetzgerät Typ 2229 k napájení LED diod.

Jako zdroj světelného záření jsem využíval 5 různých barev 5 mm LED diod, které představovaly vlnové délky od 470 do 624 nm. V tabulce 5.1 jsou uvedené všechny LED diody s jejich základními parametry. Hodnota vlnové délky pro bílou LED diodu není v tabulce uvedená, jelikož tyto diody nemají jednoznačnou vlnovou délku, ale k účelu této práce tuto hodnotu není potřeba znát.



Obrázek 5.2: Zdroj Statron Labornetzgerät Typ 2229

### 5.2.1 Parametry

#### *Fotodetektor Thorlabs S121C*

- Rozsah vlnových délek 400-1100nm
- Výkonový rozsah 500 nW – 500 mW
- Nejistota měření  $\pm 3\%$  440 – 980 nm,  $\pm 5\%$  400 – 439,  $\pm 7\%$  981 – 1100 nm

*Power and Energy Meter Thorlabs PM100USB*

- Rozsah vlnových délek 185 nm – 25  $\mu\text{m}$
- Výkonový rozsah 100 pW – 200 W
- Šířka pásma 100 kHz

*Statron Labornetzgerät Typ 2229*

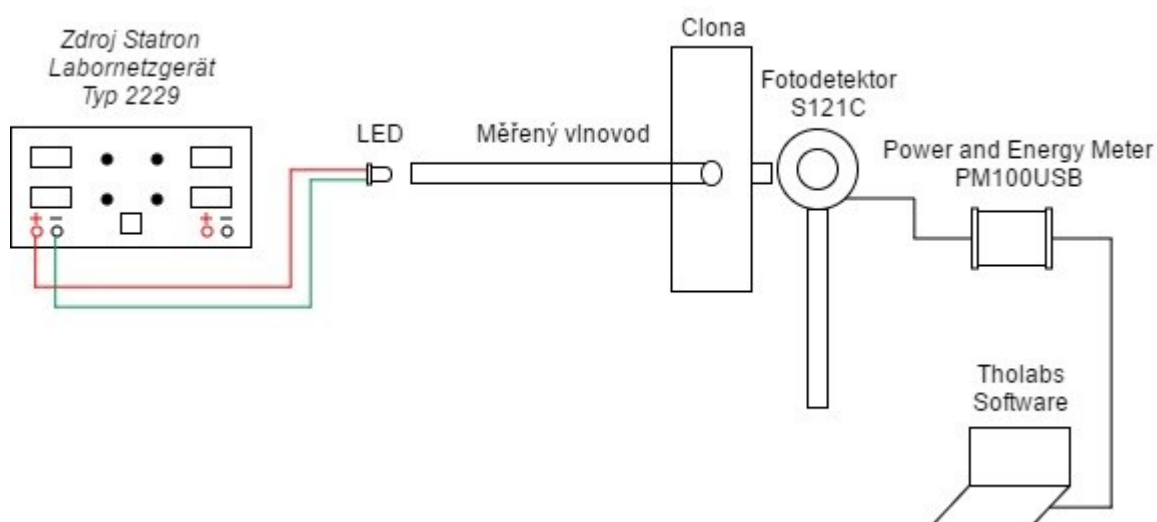
- Výstupní napětí 0 – 40 V
- Výstupní proud 0 – 2,5 A
- Zvlnění 2 mV, 3 mA

*Světelné zdroje LED*

Barva LED	Svítivost [mcd]	Napětí [V]	Proud [mA]	Vlnová délka [nm]
Bílá	20000	3,2	25	-
Modrá	4500	3,3	30	470
Zelená	7000	3,2	30	530
Žlutá	1500	2,1	30	590
Červená	5000	2	25	624

Tabulka 5.1: Základní parametry LED diod

### 5.2.2 Blokové schéma zapojení



Obrázek 5.3: Blokové schéma



### 5.3 Abbého refraktometr

Přístroj původně navržený a sestavený německým fyzikem Enrstem Abbem po něm je i pojmenovaný. K měření indexu lomu se u tohoto přístroje vzorek umísťuje mezi osvětlovací a měřicí hranol v tekutém nebo pevném skupenství. Refraktometr je navržen k měření vzorků s menší hodnotou indexu lomu než měřicí hranol, který je typický tvořen ze skla s indexem lomu pohybující se okolo hodnoty 1,7. K měření byl konkrétně použit refraktometr ABBE AR4, který je zobrazen na obrázku 5.4. Jako světelné zdroje byly použité stejné LED diody jako při měření měrného útlumu.[21]



Obrázek 5.4: *Refraktometr ABBE AR4*

#### 5.3.1 Parametry

*Parametry refraktometru ABBE AR:*

- Rozsah indexu lomu 1,3 – 1,7
- Dělení stupnice 0.0005
- Přesnost měření 0.0002



## 6 Praktické měření

### 6.1 Měření útlumu

Před začátkem měření si bylo nutné určit pár pravidel, které měly zajistit co největší opakovatelnost měření. Část této opakovatelnosti zajišťovala již zkonstruována sestava. Následně si bylo nutné očíslovat jednotlivé vlnovody a ohlídat si umístění na sestavu, tak aby strana navazující světlo byla vždy ta stejná strana. Pro každý poměr bylo vytvořeno 10 vlnovodů zarovnaných na délku 10 centimetrů, na kterých se následně provádělo měření.

Dalším krokem si bylo nutné určit metodiku měření. Měření pro každý poměr zahrnoval 10 sérií měření na všech pěti barvách, kde jedna série představovala změření všech deseti vlnovodů daného poměru. Na měřicí sestavě docházelo k milimetrovým výchylkám světelného zdroje, které způsobovaly mírné změny v naměřených hodnotách. Z toho důvodu se před každou sérií provedlo změření referenčního výkonu. Další faktory ovlivňující výsledné hodnoty byla čistota vlnovodu, kvalita řezu a již zmíněné umístění na sestavě. Samotné měření se ovládalo přes softwarový program, kde byla možnost si nastavit počet a interval měření.

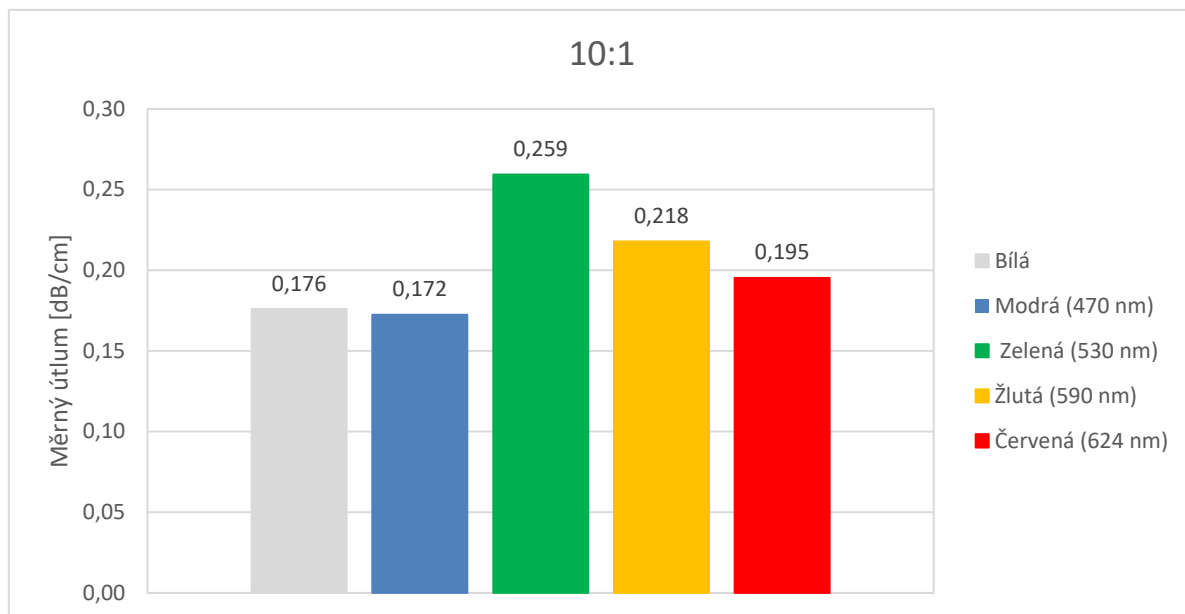
Z měření se vždy získaly hodnoty vstupního a výstupního výkonu. Tyto dvě hodnoty se následně přepočítaly za pomoci vzorce 1.3 na měrný útlum. Každý vlnovod měl tedy 10 různých hodnot měrného útlumu, které se následně zprůměrovaly na výsledný měrný útlum. V následujících podkapitolách jsou uvedené tabulky a grafy, které obsahují průměrné hodnoty vlnovodů jednotlivých poměrů pro všech pět barev.

#### 6.1.1 Poměr 10:1

Tento poměr budu používat jako referenční, jelikož je doporučovaný výrobcem pro dosažení optimálních parametrů, tudíž budu srovnávat ostatní poměry právě s tímto poměrem.

	Bílá	Modrá (470 nm)	Zelená (530 nm)	Žlutá (590 nm)	Červená (624 nm)
Číslo vlnovodu	Měrný útlum [dB/cm]				
Vlnovod č. 1	0,187	0,151	0,228	0,190	0,175
Vlnovod č. 2	0,213	0,204	0,298	0,214	0,208
Vlnovod č. 3	0,273	0,246	0,322	0,244	0,196
Vlnovod č. 4	0,125	0,115	0,210	0,197	0,182
Vlnovod č. 5	0,180	0,165	0,271	0,235	0,201
Vlnovod č. 6	0,202	0,204	0,296	0,226	0,200
Vlnovod č. 7	0,116	0,122	0,212	0,197	0,172
Vlnovod č. 8	0,129	0,158	0,201	0,188	0,168
Vlnovod č. 9	0,204	0,227	0,318	0,275	0,261
Vlnovod č. 10	0,132	0,134	0,237	0,213	0,191
Průměrná hodnota měrného útlumu	0,176	0,172	0,259	0,218	0,195
Rozptyl	2,052E-03	1,668E-03	1,816E-03	6,298E-04	5,799E-04

Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty poměru 10:1



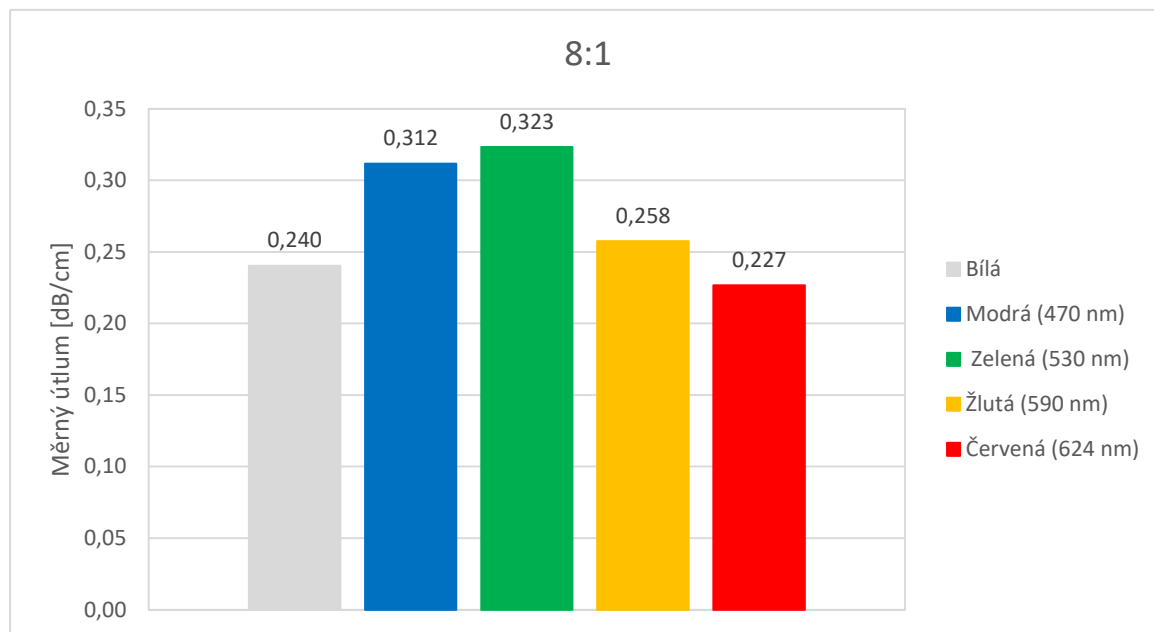
Obrázek 6.1: Průměrný měrný útlum poměru 10:1

Nejnižší hodnota měrného útlumu byla u tohoto poměru zaznamenána na vlnové délce 470 nm, která představovala modrou barvu, konkrétně se jednalo o hodnotu 0,172 dB/cm. Naopak nejhorší hodnota 0,259 dB/cm byla zaznamenána na vlnové délce 530 nm, která představovala zelenou barvu.

### 6.1.2 Poměr 8:1

	Bílá	Modrá (470 nm)	Zelená (530 nm)	Žlutá (590 nm)	Červená (624 nm)
<b>Číslo vlnovodu</b>	<b>Měrný útlum [dB/cm]</b>				
<b>Vlnovod č. 1</b>	0,232	0,293	0,344	0,263	0,230
<b>Vlnovod č. 2</b>	0,219	0,295	0,280	0,244	0,199
<b>Vlnovod č. 3</b>	0,249	0,313	0,327	0,265	0,223
<b>Vlnovod č. 4</b>	0,201	0,217	0,248	0,279	0,181
<b>Vlnovod č. 5</b>	0,258	0,340	0,355	0,258	0,248
<b>Vlnovod č. 6</b>	0,229	0,293	0,285	0,239	0,208
<b>Vlnovod č. 7</b>	0,233	0,297	0,307	0,242	0,208
<b>Vlnovod č. 8</b>	0,220	0,306	0,298	0,233	0,211
<b>Vlnovod č. 9</b>	0,273	0,382	0,399	0,271	0,280
<b>Vlnovod č. 10</b>	0,290	0,381	0,390	0,282	0,278
<b>Průměrná hodnota měrného útlumu</b>	0,240	0,312	0,323	0,258	0,227
<b>Rozptyl</b>	6,599E-04	2,058E-03	2,153E-03	2,689E-04	9,781E-04

Tabulka 6.2: Naměřené hodnoty poměru 8:1



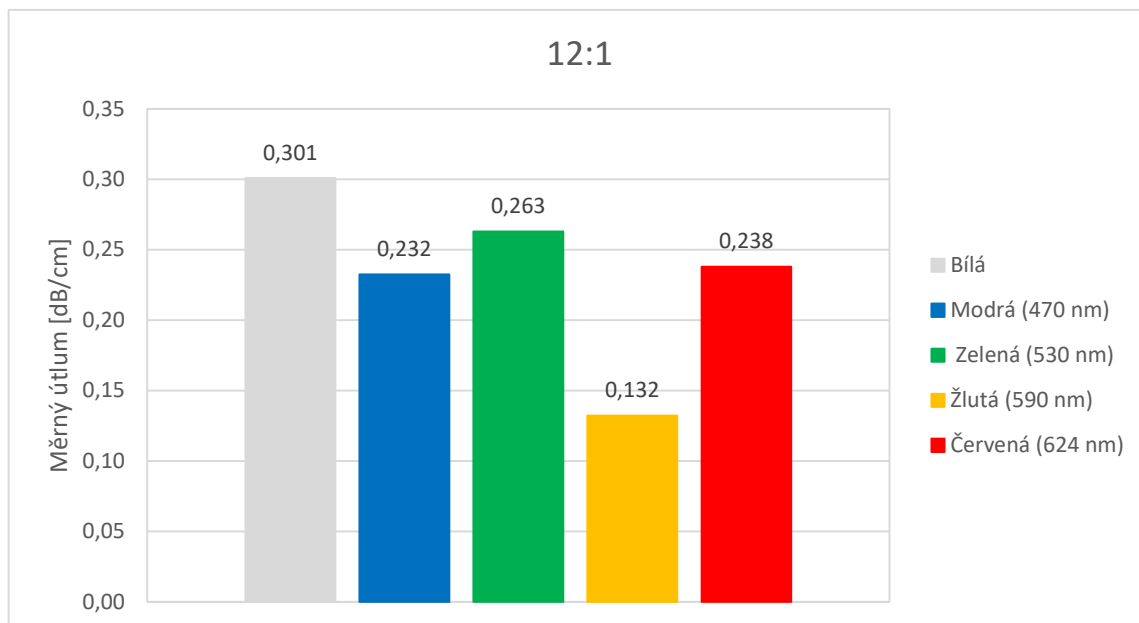
Obrázek 6.2: Průměrný měrný útlum poměru 8:1

Podobně jako na poměru 10:1, tak i zde byla zaznamenána nejhorší hodnota měrného útlumu na zelené barvě s vlnovou délkou 530 nm, nejlepší hodnota byla pak naměřena na červené barvě, která má vlnovou délkou 624 nm. Celkově ve srovnání s poměrem 10:1 došlo k zhoršení útlumů na všech vlnových délkách.

### 6.1.3 Poměr 12:1

	Bílá	Modrá (470 nm)	Zelená (530 nm)	Žlutá (590 nm)	Červená (624 nm)
<b>Číslo vlnovodu</b>	<b>Měrný útlum [dB/km]</b>				
<b>Vlnovod č. 1</b>	0,329	0,199	0,271	0,112	0,246
<b>Vlnovod č. 2</b>	0,258	0,250	0,299	0,136	0,284
<b>Vlnovod č. 3</b>	0,278	0,225	0,236	0,136	0,217
<b>Vlnovod č. 4</b>	0,365	0,259	0,292	0,150	0,261
<b>Vlnovod č. 5</b>	0,255	0,231	0,214	0,113	0,196
<b>Vlnovod č. 6</b>	0,278	0,224	0,229	0,114	0,200
<b>Vlnovod č. 7</b>	0,328	0,238	0,284	0,143	0,258
<b>Vlnovod č. 8</b>	0,280	0,228	0,258	0,134	0,228
<b>Vlnovod č. 9</b>	0,348	0,248	0,297	0,150	0,263
<b>Vlnovod č. 10</b>	0,290	0,223	0,250	0,135	0,225
<b>Průměrná hodnota měrného útlumu</b>	0,301	0,232	0,263	0,132	0,238
<b>Rozptyl</b>	1,221E-03	2,388E-04	7,542E-04	1,692E-04	6,976E-04

Tabulka 6.3: Naměřené hodnoty poměru 12:1



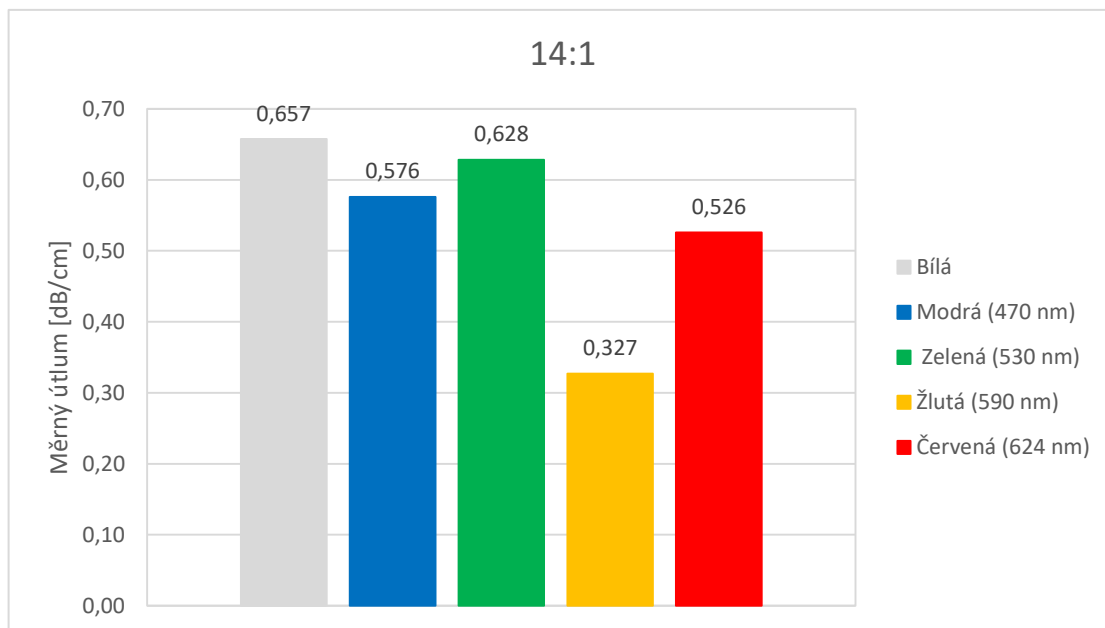
Obrázek 6.3: Průměrný měrný útlum poměru 12:1

Poměr 12:1 vykazoval nejlepší měrný útlum na vlnové délce 590 nm, kterou představovala barva žlutá. Tato hodnota, konkrétně 0,132 dB/cm, byla nejlepší v rámci tohoto poměru, ale i ve srovnání s poměrem 10:1. Na zbytku vlnových délek se pak útlumy zhoršily a naopak přesahovaly hodnoty útlumu referenčního poměru. Nejhorší měrný útlum byl naměřený na bílé barvě, kde dosahoval hodnoty 0,301 dB/cm.

#### 6.1.4 Poměr 14:1

	Bílá	Modrá (470 nm)	Zelená (530 nm)	Žlutá (590 nm)	Červená (624 nm)
Číslo vlnovodu	Měrný útlum [dB/cm]				
Vlnovod č. 1	0,604	0,529	0,583	0,278	0,491
Vlnovod č. 2	0,656	0,588	0,645	0,325	0,556
Vlnovod č. 3	0,671	0,548	0,622	0,262	0,533
Vlnovod č. 4	0,572	0,492	0,548	0,265	0,459
Vlnovod č. 5	0,737	0,722	0,761	0,430	0,593
Vlnovod č. 6	0,894	0,834	0,864	0,561	0,769
Vlnovod č. 7	0,583	0,535	0,590	0,332	0,462
Vlnovod č. 8	0,643	0,486	0,577	0,264	0,466
Vlnovod č. 9	0,606	0,529	0,552	0,289	0,467
Vlnovod č. 10	0,608	0,496	0,542	0,264	0,465
Průměrná hodnota měrného útlumu	0,657	0,576	0,628	0,327	0,526
Rozptyl	7,598E-03	1,058E-02	9,030E-03	7,756E-03	7,728E-03

Tabulka 6.4: Naměřené hodnoty poměru 14:1

Obrázek 6.4: *Průměrný měrný útlum poměru 14:1*

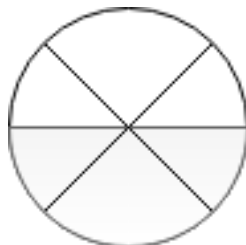
Tento poměr vykazoval očekávané zhoršení měrného útlumů na všech barvách oproti poměru 10:1. Vlnovody tohoto poměru byly špatně vytvrzené, což bylo poznat i na dotek, kdy vlnovody byly mastné a lepivé. Chyba nejspíš byla v samotném poměru, kde ve směsi bylo příliš málo tvrdidla na váhu silikonu. Nejhorší hodnota měrného útlumu 0,657 dB/cm byla na bílé barvě, nejlepší hodnota pak byla na barvě žluté, konkrétně 0,327 dB/cm.

## 6.2 Měření indexu lomu

K měření indexu lomu si bylo nutné vytvořit nové prvky z Sylgard 184 se stejnými poměry tvrdidla jako při měření útlumu, jelikož vytvořené vlnovody nebyly vhodné k měření na refraktometru. Vytvořit se museli velmi tenké plátky z každého poměru, tak aby se daly umístit mezi osvětlovací a měřicí hranol refraktometru. Na výrobu těchto plátků byly použité mikroskopická krycí sklíčka, kam se nalilo množství ze směsi. Jelikož se jednalo v podstatě o malé kapky směsi, tak se vytvořené vzduchové bubliny okamžitě rozpustily a směs bylo možné ihned nechat zapéct.

Obrázek 6.5: *Plátky silikonu*

Měření probíhalo na již zmíněném refraktometru ABBE AR4, kam se umístily vytvořené plátky silikonu nebo tekutá směs jednotlivých poměrů. Následně se ukazatel refraktometru posunul do polohy, aby se rozhraní světla a tmy v okuláru refraktometru nacházel na středu nitkového kříže, poté bylo možné odečíst přesnou hodnotu indexu lomu (obr. 6.6). Pro každý vzorek bylo provedeno 10 měření. Následně se výsledné hodnoty z měření zprůměrovaly do jedné hodnoty indexu lomu, které jsou uvedeny níže v tabulkách.

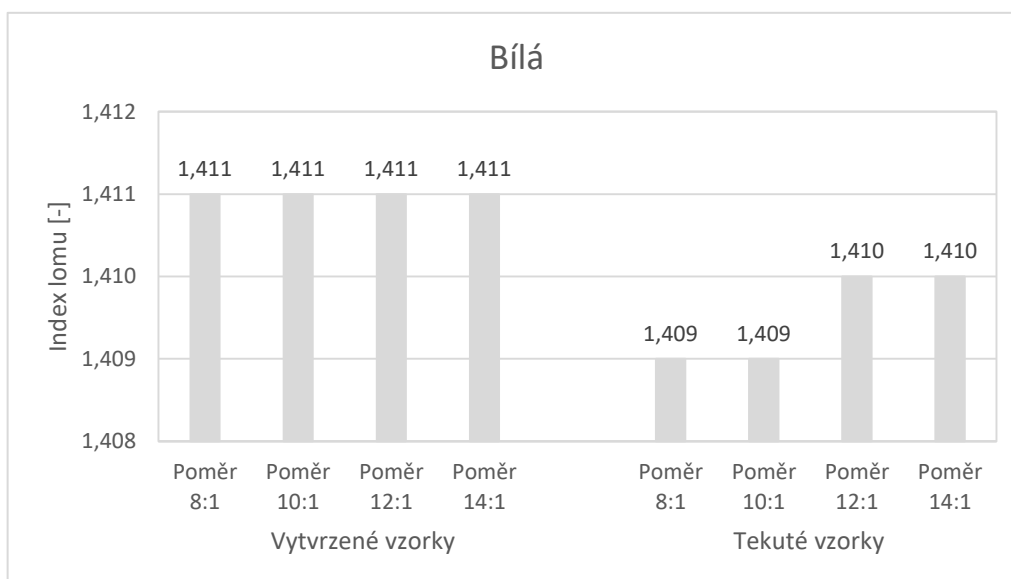


Obrázek 6.6: Nitkový kříž

### 6.2.1 Bílá barva

Vytvrzené Vzorky	Index Lomu [-]
Poměr 8:1	1,411
Poměr 10:1	1,411
Poměr 12:1	1,411
Poměr 14:1	1,411
<b>Tekuté vzorky</b>	
Poměr 8:1	1,409
Poměr 10:1	1,409
Poměr 12:1	1,410
Poměr 14:1	1,410

Tabulka 6.5: Naměřené hodnoty indexu lomu na bílé barvě

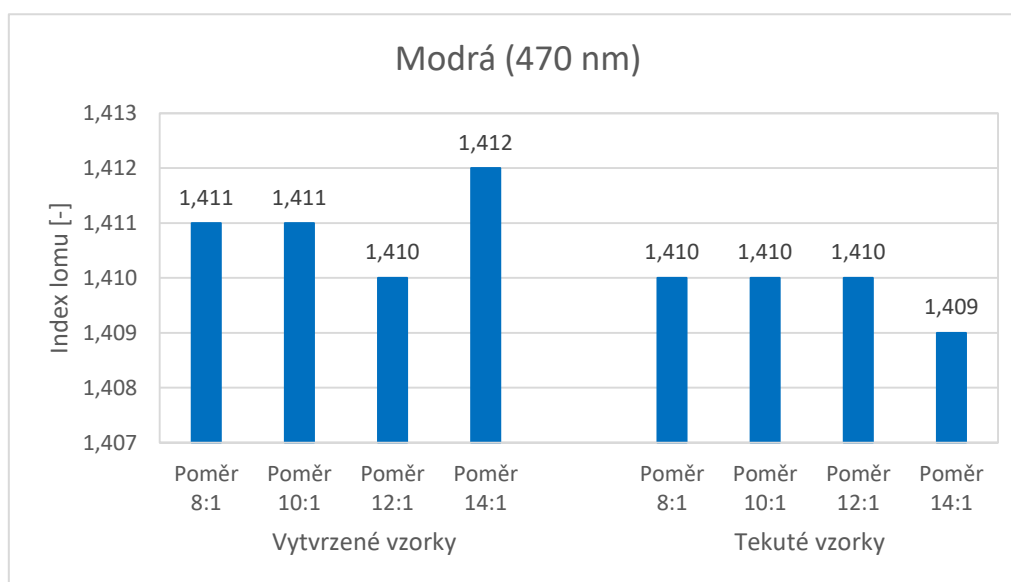


Obrázek 6.7: Index lomu poměrů na bílé barvě

## 6.2.2 Modrá barva – 470 nm

Vytvrzené Vzorky	Index Lomu [-]
Poměr 8:1	1,411
Poměr 10:1	1,411
Poměr 12:1	1,410
Poměr 14:1	1,412
<b>Tekuté vzorky</b>	
Poměr 8:1	1,410
Poměr 10:1	1,410
Poměr 12:1	1,410
Poměr 14:1	1,409

Tabulka 6.6: Naměřené hodnoty indexu lomu na modré barvě

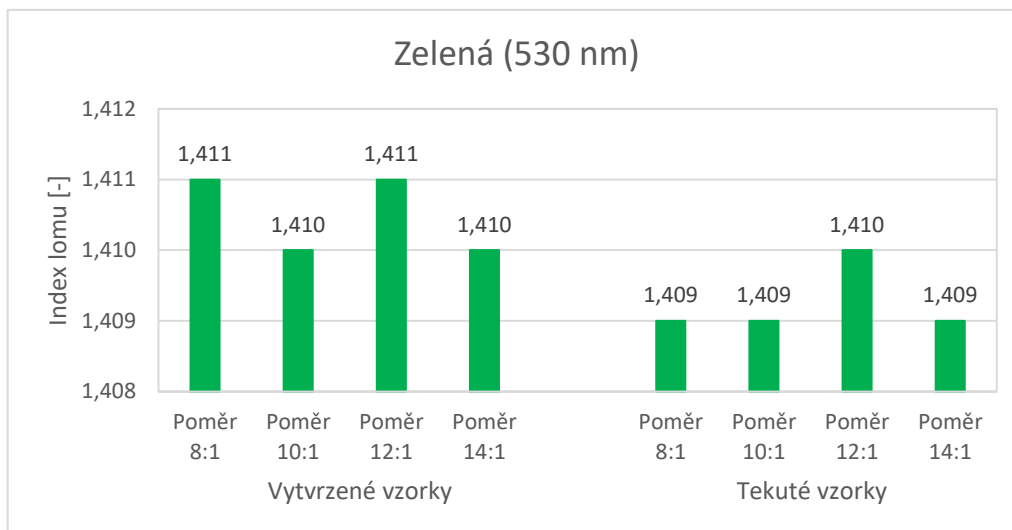


Obrázek 6.8: Index lomu poměrů modré barvě

## 6.2.3 Zelená barva – 530 nm

Vytvrzené Vzorky	Index Lomu [-]
Poměr 8:1	1,411
Poměr 10:1	1,410
Poměr 12:1	1,411
Poměr 14:1	1,410
<b>Tekuté vzorky</b>	
Poměr 8:1	1,409
Poměr 10:1	1,409
Poměr 12:1	1,410
Poměr 14:1	1,409

Tabulka 6.7: Naměřené hodnoty indexu lomu na zelené barvě

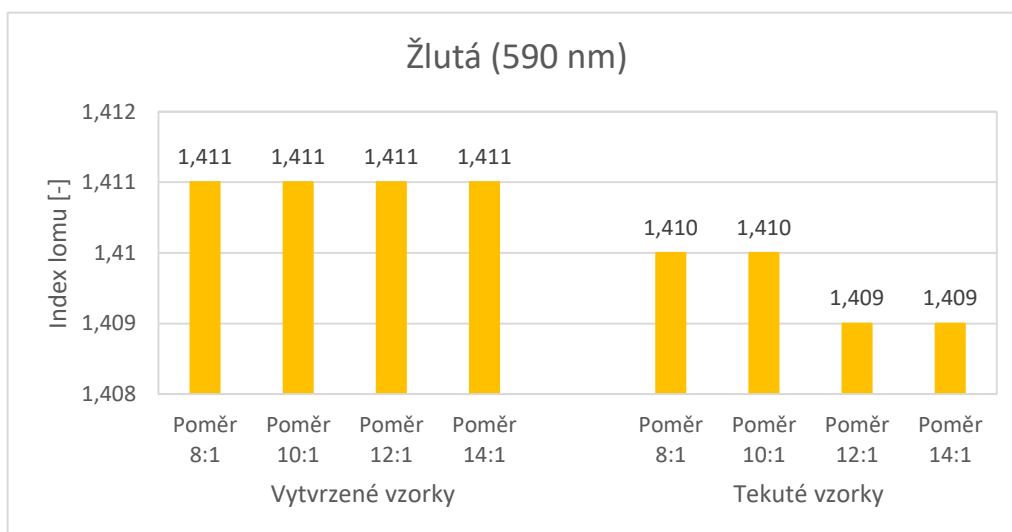


Obrázek 6.9: Index lomu poměrů na zelené barvě

#### 6.2.4 Žlutá barva – 590 nm

Vytvrzené Vzorky	Index Lomu [-]
Poměr 8:1	1,411
Poměr 10:1	1,411
Poměr 12:1	1,411
Poměr 14:1	1,411
Tekuté vzorky	
Poměr 8:1	1,410
Poměr 10:1	1,410
Poměr 12:1	1,409
Poměr 14:1	1,409

Tabulka 6.8: Naměřené hodnoty indexu lomu na žluté barvě



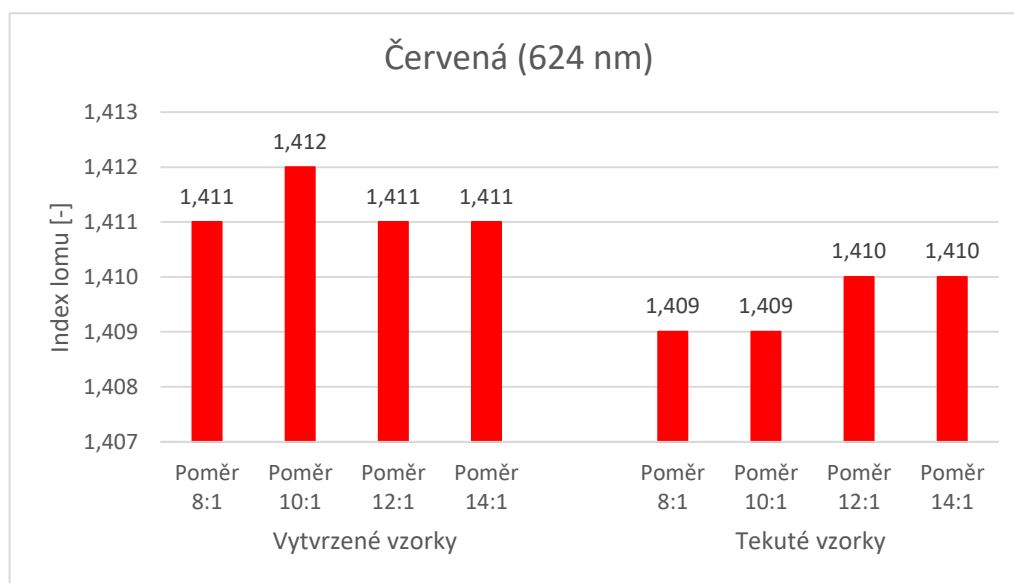
Obrázek 6.10: Index lomu poměrů na žluté barvě



## 6.2.5 Červená barva – 624 nm

Vytvrzené Vzorky	Index Lomu [-]
Poměr 8:1	1,411
Poměr 10:1	1,412
Poměr 12:1	1,411
Poměr 14:1	1,411
<b>Tekuté vzorky</b>	
Poměr 8:1	1,409
Poměr 10:1	1,409
Poměr 12:1	1,410
Poměr 14:1	1,410

Tabulka 6.9: Naměřené hodnoty indexu lomu na červené barvě



Obrázek 6.11: Index lomu poměrů na červené barvě

### 6.2.6 Zhodnocení

Pro poměr 10:1 výrobce uvádí níže uvedené hodnoty indexu lomu:

<b>Vlnová délka [nm]</b>	<b>Index lomu [-]</b>
589	1,4118
632.8	1,4225
1321	1,4028
1554	1,3997

Tabulka 6.10: *Index lomu uváděný výrobcem*

Z výše uvedených tabulek a grafů lze vidět hodnoty indexu lomu pohybující se v rozmezí od 1,409 do 1,412, což jsou hodnoty, které se přibližně shodují s hodnotami uváděnými výrobcem. Z měření lze tvrdit, že jednotlivé poměry mají velmi malý vliv na hodnotu indexu lomu pro použité barvy LED diod. Mezi pevným a tekutým silikonem také nedochází k výrazným změnám a hodnoty se většinou liší v řádu jedné tisíciny.

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv různých poměrů tvrdidla smíchané s polydimethylsiloxanem na optické parametry vlnovodů vyrobených z těchto směsí. V teoretické části jsem se zaměřil na popis jednotlivých typů optických vláken, způsob šíření světla v těchto vláknech a faktory ovlivňující přenosové parametry jako je například útlum. Další kapitola je věnována polydimethylsiloxanu, kde popisuji jeho obecné vlastnosti, využití v praxi a konkrétní typy v podobě Sylgardů. Poslední kapitola je věnována základním metodám měření útlumu využívané v praxi.

Praktická část je zaměřena na výrobu jednotlivých vlnovodů s různými poměry tvrdidla. Kromě doporučeného poměru 10:1 jsem testoval poměry 8:1, 12:1 a 14:1. Na začátku popisuji postup míchání směsi Sylgard 184 a následně metodu vytvrzování. Dále je zde popsán postup oddělení od formy a zarovnání obou konců vlnovodu. Po zvládnutí výroby optických vlnovodů jsem přešel ke konstrukci měřicí sestavy. V této kapitole se zabývám problematikou měření, popisuji zde jednotlivé komponenty měřicí sestavy, jejich základní funkčnost a účel v této sestavě.

Poslední úkolem práce bylo provést měření parametrů vytvořených vlnovodů v podobě měrného útlumu a index lomu. Ve výrobě bylo vytvořeno 10 vlnovodů pro každý poměr, na kterých probíhalo měření v 10 sériích na vybraných vlnových délkách, kde jedna série představovala proměření všech deseti vlnovodů daného poměru. Jako zdroj světelného záření byly použity LED diody v (5 barev). Měření bylo zaměřeno na zjištění výkonů, kde díky získaného vstupního a výstupního výkonu bylo možné dopočítat měrný útlum. Výsledné hodnoty měrného útlumu jsou dány aritmetickým průměrem všech vypočtených hodnot pro jednotlivé vzorky na dané vlnové délce. Nejnižší útlumy vykazoval poměr 10:1, kde byla nejnižší hodnota zaznamenaná na modré barvě s vlnovou délkou 470 nm, konkrétně se jednalo o hodnotu 0,172 dB/cm. Naopak nejhorší hodnoty byly na poměru 14:1, což bylo očekávané, jelikož výroba vzorků tohoto poměru nedopadla ideálně. Poslední dva poměry 8:1 a 12:1 dopadly lépe než poměr 14:1, ale ve srovnání s doporučeným poměrem je zde nárůst útlumu na většině testovaných barvách.

Na měření hodnoty indexu lomu byl použit Abbého refraktometr. Zde si bylo nutné vytvořit nové prvky z polydimethylsiloxanu, jelikož vytvořené optické vlnovody nebylo možné umístit mezi osvětlující a měřicí hranol refraktometru. K měření indexu lomu byly vytvořené tenké plátky silikonu s jednotlivými poměry, které bylo možné umístit mezi prostor hranolů refraktometru. Kromě vytvrzených plátků silikonu bylo měření provedeno i pro tekutou směs každého poměru. Výsledné hodnoty indexu lomu se pohybovaly v rozmezí od 1,409 do 1,412 a přibližně odpovídaly hodnotám uváděných výrobcem.

V případě měření měrného útlumu lze říci, že různé poměry tvrdidla mají dopad na výsledné hodnoty měrného útlumu. Pokud tedy budeme chtít dosáhnout nejlepších možných hodnot měrného útlumu, tak by se měl používat výrobcem doporučený poměr k výrobě optických prvků. Co se týče vlivu poměrů, vytvrzeného či nevytvrzeného silikonu na index lomu, tak se zde ukázal minimální vliv na výsledné hodnoty. K dosažení odlišných hodnot indexu lomu by se muselo měření nejspíš provádět na vyšších vlnových délkách než těch, které byly použité v této práci.

## Použitá literatura

- [1] EMOS - OPTEL: elektronický modulární systém : telekomunikace a optická vlákna : komplexní stavebnicový soubor pro výuku přenosu informací po optických vláknech[odborná recenze: Maciej Kucharski, Jan Brouček] ; [překlad z angličtiny]. 3. vyd. Praha: Elcom Education, 1993. ISBN 80-900721-4-3.
- [2] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky: optoelektronické prvky a optická vlákna. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] NOVÁK, Martin. Studium optických vlnodů z polydimethylsiloxanu : diplomová práce. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [4] DOLEŽAL, Ondřej. Využití POF v přístupových sítích. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, Csc.
- [5] DAUM, W., J. KRAUSER, O. ZIEMANN a P.E. ZAMZOW. POF Handbook : optical short range transmission systems. Springer, 2008. ISBN 978-3-540-76628-5.
- [6] BOHÁČ, Leoš. Měření optických vláken [online]. Praha. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/160.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf). České vysoké učení technické v Praze.
- [7] ŽÁK, Ondřej. Vliv útlumu optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Reichert.
- [8] MARŠÁLEK, Leoš. Optické vlákna: verze 2.1.3 [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [9] BOHÁČ, Leoš. Optické sítě [online]. Praha [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/161.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf). České vysoké učení technické v Praze.
- [10] VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z polydimethylsiloxanu (PDMS) : diplomová práce. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, fakulta elektrotechniky a informatiky, 2016. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šiška, Ph.D.
- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [12] Polydimethylsiloxane. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane>
- [13] ŠTEGBAUER, Radek. Silikony v elektrotechnice : diplomová práce. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2012. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [14] DE PAOLI, Federico. Measuring Polydimethylsiloxane (PDMS) Mechanical Properties Using Flat Punch Nanoindentation Focusing on Obtaining Full Contact. Florida, 2015. Disertační práce.

University of South Florida. Vedoucí práce Alex. A. Volinsky, Ph.D., Nathan Gallant, Ph.D., Rasim Guldiken, Ph.D.

- [15] Sylgard 160. Elchemco.cz [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/45/sylgard-160/>
- [16] Sylgard 170. [Http://www.elchemco.cz](http://www.elchemco.cz) [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/17/sylgard-170/>
- [17] Sylgard 182 a 184. [Http://www.elchemco.cz](http://www.elchemco.cz) [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/25/sylgard-182-a-184/>
- [18] Sylgard 517. [Http://www.elchemco.cz](http://www.elchemco.cz) [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/15/sylgard-517/>
- [19] Měření optických vláken a optických kabelových tras. [Https://publi.cz/](https://publi.cz/) [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/14.html>
- [20] AMBROŽ, Jan. Měření optických přenosových tras. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Reichert.
- [21] Abbe refractometer. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Abbe\\_refractometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Abbe_refractometer)

## Seznam příloh

Příloha A:	Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na bílé barvě.....	I
Příloha B:	Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na modré barvě.....	V
Příloha C:	Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na zelené barvě.....	IX
Příloha D:	Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na žluté barvě.....	XIII
Příloha E:	Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na červené barvě.....	XVII
Příloha F:	Naměřené hodnoty indexu lomu vytvrzených vzorků pro všechny použité barvy...	XXI
Příloha G:	Naměřené hodnoty indexu lomu tekutých vzorků pro všechny použité barvy.....	XXIV

Příloha A: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na bílé barvě*

Poměr 8:1										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	14,111	14,183	14,159	13,924	14,1	13,572	14,12	14,142	14,102	14,032
Výstupní výkon [mW]										
Vlnovod č.1	8,677	8,317	8,586	8,046	8,233	8,334	8,165	7,683	8,092	8,292
Vlnovod č.2	8,39	8,423	8,536	8,55	8,458	8,805	8,831	8,206	8,332	8,262
Vlnovod č.3	7,732	7,751	7,948	8,001	7,965	7,858	7,989	8,004	8,034	7,896
Vlnovod č.4	7,505	8,336	8,675	9,119	8,802	9,098	8,946	9,498	9,727	8,92
Vlnovod č.5	7,731	7,4	7,98	7,634	8,114	7,802	7,799	7,831	7,465	7,734
Vlnovod č.6	8,024	7,987	8,34	8,651	8,658	8,064	8,336	8,176	8,483	8,209
Vlnovod č.7	8,437	8,434	7,914	8,223	8,194	8,484	7,683	8,419	8,269	8,169
Vlnovod č.8	8,967	8,924	8,715	8,377	7,929	8,26	8,688	8,282	8,459	8,053
Vlnovod č.9	7,712	7,338	7,421	7,295	7,553	7,713	7,742	7,542	7,24	7,322
Vlnovod č.10	7,656	7,118	7,024	7,042	7,179	7,016	7,211	7,387	7,275	7,173

Poměr 8:1										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,211	0,232	0,217	0,238	0,234	0,212	0,238	0,265	0,241	0,228
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,226	0,226	0,220	0,212	0,222	0,188	0,204	0,236	0,229	0,230
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,261	0,262	0,251	0,241	0,248	0,237	0,247	0,247	0,244	0,250
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,274	0,231	0,213	0,184	0,205	0,174	0,198	0,173	0,161	0,197
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,261	0,283	0,249	0,261	0,240	0,240	0,258	0,257	0,276	0,259
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,245	0,249	0,230	0,207	0,212	0,226	0,229	0,238	0,221	0,233
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,223	0,226	0,253	0,229	0,236	0,204	0,264	0,225	0,232	0,235
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,197	0,201	0,211	0,221	0,250	0,216	0,211	0,232	0,222	0,241
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,262	0,286	0,281	0,281	0,271	0,245	0,261	0,273	0,290	0,282
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,266	0,299	0,304	0,296	0,293	0,287	0,292	0,282	0,287	0,291

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	8,023	8,186	7,982	7,887	8,18	8,044	8,025	8,095	7,93	8,048
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	4,9	5,159	5,331	5,142	4,558	4,677	5,477	5,538	5,939	5,741
Vlnovod č.2	5,126	5,318	4,99	5,442	3,837	4,483	5,409	4,939	5,074	4,893
Vlnovod č.3	3,421	4,541	3,618	4,305	4,278	3,979	4,832	4,521	4,92	4,795
Vlnovod č.4	6,038	5,869	6,413	5,933	5,283	6,035	6,267	6,25	6,235	6,088
Vlnovod č.5	5,235	5,152	4,457	5,014	5,115	5,621	5,942	5,27	5,724	5,757
Vlnovod č.6	4,943	5,452	3,771	4,941	4,979	5,199	5,609	5,328	5,536	5,067
Vlnovod č.7	6,353	5,46	5,631	6,458	6,352	6,074	6,502	5,733	6,662	6,388
Vlnovod č.8	6,029	6,019	6,034	5,987	6,001	5,967	5,974	5,867	5,912	6,01
Vlnovod č.9	5,075	5,22	5,234	5,028	5,235	5,092	4,871	4,83	4,831	4,909
Vlnovod č.10	6,092	6,554	5,239	5,076	6,381	6,28	6,302	5,431	5,989	6,187

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,214	0,201	0,175	0,186	0,254	0,236	0,166	0,165	0,126	0,147
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,195	0,187	0,204	0,161	0,329	0,254	0,171	0,215	0,194	0,216
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,370	0,256	0,344	0,263	0,282	0,306	0,220	0,253	0,207	0,225
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,123	0,145	0,095	0,124	0,190	0,125	0,107	0,112	0,104	0,121
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,185	0,201	0,253	0,197	0,204	0,156	0,131	0,186	0,142	0,145
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,210	0,177	0,326	0,203	0,216	0,190	0,156	0,182	0,156	0,201
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,101	0,176	0,152	0,087	0,110	0,122	0,091	0,150	0,076	0,100
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,124	0,134	0,122	0,120	0,135	0,130	0,128	0,140	0,128	0,127
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,199	0,195	0,183	0,196	0,194	0,199	0,217	0,224	0,215	0,215
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,120	0,097	0,183	0,191	0,108	0,108	0,105	0,173	0,122	0,114



<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	13,126	13,071	13,11	12,943	13	13,17	13,089	13,161	13,018	13,038
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	6,318	6,125	6,059	6,052	6,321	6,057	6,065	6,138	6,186	5,977
Vlnovod č.2	6,901	7,242	7,129	7,564	7,045	7,347	7,427	7,32	7,123	7,125
Vlnovod č.3	7,107	7,21	6,977	6,954	6,914	6,888	6,946	6,849	6,549	6,583
Vlnovod č.4	5,385	5,691	6,13	6,062	5,65	5,53	5,693	5,627	5,383	5,327
Vlnovod č.5	7,175	7,258	7,452	7,175	7,497	7,427	7,142	7,237	7,335	7,035
Vlnovod č.6	7,022	6,963	7,065	6,984	7,078	7,161	6,618	6,746	6,684	6,621
Vlnovod č.7	6,245	6,273	6,381	6,033	6,342	6,065	5,946	6,183	6,039	5,953
Vlnovod č.8	6,811	6,588	6,9	6,923	6,875	6,637	6,764	7,066	7,109	6,991
Vlnovod č.9	6,037	5,974	5,955	5,955	6,064	5,695	5,687	5,82	5,82	5,674
Vlnovod č.10	6,646	6,665	6,982	6,868	6,741	6,414	6,507	6,747	6,476	6,966

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,318	0,329	0,335	0,330	0,313	0,337	0,334	0,331	0,323	0,339
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,279	0,256	0,265	0,233	0,266	0,253	0,246	0,255	0,262	0,262
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,266	0,258	0,274	0,270	0,274	0,281	0,275	0,284	0,298	0,297
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,387	0,361	0,330	0,329	0,362	0,377	0,362	0,369	0,384	0,389
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,262	0,255	0,245	0,256	0,239	0,249	0,263	0,260	0,249	0,268
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,272	0,274	0,268	0,268	0,264	0,265	0,296	0,290	0,290	0,294
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,323	0,319	0,313	0,332	0,312	0,337	0,343	0,328	0,334	0,340
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,285	0,298	0,279	0,272	0,277	0,298	0,287	0,270	0,263	0,271
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,337	0,340	0,343	0,337	0,331	0,364	0,362	0,354	0,350	0,361
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,296	0,293	0,274	0,275	0,285	0,312	0,304	0,290	0,303	0,272

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	9,018	9,151	9,198	9,14	9,026	9,35	9,346	9,196	9,106	9,126
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	2,478	2,426	2,132	2,313	2,244	2,266	2,351	2,128	2,259	2,249
Vlnovod č.2	2,167	2,149	2,043	2,034	2,083	2,039	1,881	1,908	1,955	1,983
Vlnovod č.3	2,052	1,962	2,214	1,946	1,904	2,016	1,893	1,877	1,888	1,837
Vlnovod č.4	2,617	2,491	2,58	2,576	2,246	2,386	2,414	2,555	2,445	2,272
Vlnovod č.5	1,882	1,615	1,644	1,827	1,703	1,622	1,609	1,706	1,668	1,545
Vlnovod č.6	1,228	1,134	1,128	1,131	1,165	1,224	1,13	1,201	1,137	1,221
Vlnovod č.7	2,456	2,506	2,424	2,321	2,253	2,608	2,325	2,325	2,395	2,322
Vlnovod č.8	2,059	2,103	2,087	2,108	2,164	2,05	2,084	2,11	2,046	2,029
Vlnovod č.9	2,403	2,249	2,237	2,403	2,159	2,292	2,222	2,234	2,201	2,329
Vlnovod č.10	2,102	2,592	2,263	2,35	2,159	2,231	2,227	2,308	2,266	2,162

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,561	0,577	0,635	0,597	0,604	0,616	0,599	0,636	0,605	0,608
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,619	0,629	0,653	0,653	0,637	0,661	0,696	0,683	0,668	0,663
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,643	0,669	0,619	0,672	0,676	0,666	0,693	0,690	0,683	0,696
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,537	0,565	0,552	0,550	0,604	0,593	0,588	0,556	0,571	0,604
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,680	0,753	0,748	0,699	0,724	0,761	0,764	0,732	0,737	0,771
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,866	0,907	0,911	0,907	0,889	0,883	0,918	0,884	0,904	0,874
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,565	0,562	0,579	0,595	0,603	0,555	0,604	0,597	0,580	0,594
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,641	0,639	0,644	0,637	0,620	0,659	0,652	0,639	0,648	0,653
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,574	0,609	0,614	0,580	0,621	0,611	0,624	0,615	0,617	0,593
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,632	0,548	0,609	0,590	0,621	0,622	0,623	0,600	0,604	0,625

Příloha B: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na modré barvě*

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	12,968	12,963	12,961	12,696	12,26	12,43	12,46	12,37	12,48	12,41
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	6,948	6,783	6,557	6,303	6,086	6,171	6,426	6,286	6,358	6,289
Vlnovod č.2	7,064	6,774	6,679	6,142	6,263	6,228	6,29	6,117	6,105	6,302
Vlnovod č. 3	6,409	6,22	6,218	5,645	5,582	6,294	6,287	6,16	6,369	6,157
Vlnovod č.4	7,928	7,862	7,854	7,231	7,436	7,217	7,879	7,875	7,57	7,544
Vlnovod č.5	6,182	6,054	5,978	5,145	5,43	5,576	5,942	5,855	5,785	5,726
Vlnovod č.6	6,674	6,678	6,38	5,909	6,262	6,242	6,616	6,321	6,724	6,436
Vlnovod č.7	6,671	6,559	6,359	6,358	6,518	6,532	6,185	6,188	6,159	6,01
Vlnovod č.8	6,505	6,127	6,174	6,145	6,01	6,215	6,154	6,137	6,543	6,343
Vlnovod č.9	5,708	5,518	5,245	4,833	5,05	5,25	5,136	5,284	5,099	5,2
Vlnovod č.10	5,344	5,476	5,102	4,933	5,274	5,317	5,371	5,181	5,203	5,272

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,271	0,281	0,296	0,304	0,304	0,304	0,288	0,294	0,293	0,295
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,264	0,282	0,288	0,315	0,292	0,300	0,297	0,306	0,311	0,294
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,306	0,319	0,319	0,352	0,342	0,296	0,297	0,303	0,292	0,304
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,214	0,217	0,218	0,244	0,217	0,236	0,199	0,196	0,217	0,216
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,322	0,331	0,336	0,392	0,354	0,348	0,322	0,325	0,334	0,336
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,288	0,288	0,308	0,332	0,292	0,299	0,275	0,292	0,269	0,285
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,289	0,296	0,309	0,300	0,274	0,279	0,304	0,301	0,307	0,315
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,300	0,325	0,322	0,315	0,310	0,301	0,306	0,304	0,280	0,291
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,356	0,371	0,393	0,419	0,385	0,374	0,385	0,369	0,389	0,378
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,385	0,374	0,405	0,411	0,366	0,369	0,365	0,378	0,380	0,372

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	8,505	8,337	8,321	8,144	8,07	8,453	8,091	7,988	8	8,707
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	5,816	5,969	6,103	5,959	6,013	5,833	5,963	5,798	5,502	5,474
Vlnovod č.2	4,864	5,674	4,678	5,117	5,646	5,657	4,573	5,399	5,067	5,141
Vlnovod č.3	4,714	4,456	4,747	4,898	4,704	4,992	4,261	4,739	4,863	4,578
Vlnovod č.4	6,453	6,443	6,378	6,564	6,26	6,246	6,096	6,2	6,449	6,347
Vlnovod č.5	6,204	5,734	5,524	5,949	5,686	5,576	5,219	5,382	5,79	5,469
Vlnovod č.6	5,45	5,351	5,571	5,58	4,919	4,823	4,834	4,992	5,184	5,016
Vlnovod č.7	6,47	6,631	6,307	6,04	6,058	6,69	6,049	5,526	6,154	6,559
Vlnovod č.8	6,349	6,327	6,231	2,297	6,417	6,43	6,422	6,419	6,219	6,423
Vlnovod č.9	4,851	4,901	4,91	4,899	4,913	4,925	4,891	4,902	4,933	4,896
Vlnovod č.10	6,243	6,293	6,001	6,414	5,89	6,391	5,471	5,827	6,295	5,845

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,165	0,145	0,135	0,136	0,128	0,161	0,133	0,139	0,163	0,202
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,243	0,167	0,250	0,202	0,155	0,174	0,248	0,170	0,198	0,229
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,256	0,272	0,244	0,221	0,234	0,229	0,278	0,227	0,216	0,279
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,120	0,112	0,115	0,094	0,110	0,131	0,123	0,110	0,094	0,137
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,137	0,163	0,178	0,136	0,152	0,181	0,190	0,171	0,140	0,202
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,193	0,193	0,174	0,164	0,215	0,244	0,224	0,204	0,188	0,240
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,119	0,099	0,120	0,130	0,125	0,102	0,126	0,160	0,114	0,123
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,127	0,120	0,126	0,550	0,100	0,119	0,100	0,095	0,109	0,132
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,244	0,231	0,229	0,221	0,216	0,235	0,219	0,212	0,210	0,250
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,134	0,122	0,142	0,104	0,137	0,121	0,170	0,137	0,104	0,173

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	13,224	13,567	13,839	13,692	13,871	13,91	13,86	13,43	13,95	13,88
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	8,169	8,789	9,525	8,552	9,373	8,827	8,754	8,399	8,043	8,397
Vlnovod č.2	7,664	7,602	7,391	7,241	7,945	8,161	7,674	7,873	7,544	8,069
Vlnovod č.3	8,264	8,337	8,265	8,125	8,022	8,036	8,346	7,872	8,36	8,109
Vlnovod č.4	7,629	7,652	8,252	7,492	7,566	7,351	7,148	7,576	7,326	7,668
Vlnovod č.5	8,434	8,597	8,249	8,447	8,126	8,106	7,726	7,888	7,741	7,396
Vlnovod č.6	8,615	8,236	8,217	8,89	8,237	8,007	7,535	8,662	8,159	7,527
Vlnovod č.7	8,31	8,114	8,409	8,052	8,103	8,291	7,91	7,438	7,577	7,175
Vlnovod č.8	7,313	8,697	8,189	8,063	8,204	8,016	8,479	8,359	7,949	7,972
Vlnovod č.9	7,521	7,752	7,827	8,072	7,504	7,689	7,78	8,006	7,473	7,93
Vlnovod č.10	7,899	8,413	7,93	8,092	8,074	8,13	8,907	8,136	8,444	8,147

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,209	0,189	0,162	0,204	0,170	0,198	0,200	0,204	0,239	0,218
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,237	0,252	0,272	0,277	0,242	0,232	0,257	0,232	0,267	0,236
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,204	0,211	0,224	0,227	0,238	0,238	0,220	0,232	0,222	0,233
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,239	0,249	0,225	0,262	0,263	0,277	0,288	0,249	0,280	0,258
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,195	0,198	0,225	0,210	0,232	0,235	0,254	0,231	0,256	0,273
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,186	0,217	0,226	0,188	0,226	0,240	0,265	0,190	0,233	0,266
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,202	0,223	0,216	0,231	0,233	0,225	0,244	0,257	0,265	0,287
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,257	0,193	0,228	0,230	0,228	0,239	0,213	0,206	0,244	0,241
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,245	0,243	0,248	0,229	0,267	0,257	0,251	0,225	0,271	0,243
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,224	0,208	0,242	0,228	0,235	0,233	0,192	0,218	0,218	0,231

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	9,409	9,532	9,38	9,256	9,647	9,573	9,661	9,361	9,249	9,804
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	3,017	2,794	2,922	2,837	2,922	2,889	2,771	2,774	2,523	2,649
Vlnovod č.2	2,438	2,454	2,473	2,671	2,507	2,461	2,352	2,47	2,357	2,328
Vlnovod č. 3	3,243	3,433	3,077	3,357	2,498	2,465	2,483	2,31	2,21	2,165
Vlnovod č.4	3,444	3,161	3,458	3,209	3,052	2,886	3,01	2,937	2,794	2,705
Vlnovod č.5	1,972	2,065	2,042	1,922	1,914	1,66	1,725	1,692	1,483	1,607
Vlnovod č.6	1,53	1,506	1,573	1,483	1,481	1,534	1,248	1,294	1,211	1,134
Vlnovod č.7	2,914	3,042	3,074	3,27	2,998	2,761	2,74	2,276	2,407	2,365
Vlnovod č.8	3,133	3,148	3,11	3,109	3,082	3,077	3,061	3,063	3,098	3,099
Vlnovod č.9	2,398	2,391	2,541	3,357	3,28	2,845	2,959	2,772	2,891	2,793
Vlnovod č.10	3,419	3,296	3,36	3,121	3,029	2,697	3,025	2,796	2,723	2,878

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,494	0,533	0,507	0,514	0,519	0,520	0,542	0,528	0,564	0,568
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,587	0,589	0,579	0,540	0,585	0,590	0,614	0,579	0,594	0,624
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,463	0,444	0,484	0,440	0,587	0,589	0,590	0,608	0,622	0,656
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,436	0,479	0,433	0,460	0,500	0,521	0,506	0,503	0,520	0,559
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,679	0,664	0,662	0,683	0,702	0,761	0,748	0,743	0,795	0,785
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,789	0,801	0,775	0,795	0,814	0,795	0,889	0,859	0,883	0,937
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,509	0,496	0,484	0,452	0,508	0,540	0,547	0,614	0,585	0,618
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,478	0,481	0,479	0,474	0,496	0,493	0,499	0,485	0,475	0,500
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,594	0,601	0,567	0,440	0,469	0,527	0,514	0,529	0,505	0,545
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,440	0,461	0,446	0,472	0,503	0,550	0,504	0,525	0,531	0,532

Příloha C: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na zelené barvě*

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	5,645	5,71	5,727	5,775	5,745	5,715	5,788	5,725	5,724	5,733
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	2,593	2,561	2,582	2,508	2,529	2,555	2,649	2,715	2,6	2,689
Vlnovod č.2	2,905	2,922	2,953	2,962	2,982	3,088	3,058	3,038	3,106	3,042
Vlnovod č.3	2,539	2,6	2,656	2,72	2,756	2,75	2,751	2,846	2,783	2,62
Vlnovod č.4	3,118	3,278	3,255	3,133	3,341	3,266	3,127	3,363	3,241	3,221
Vlnovod č.5	2,469	2,484	2,571	2,535	2,454	2,513	2,559	2,528	2,588	2,593
Vlnovod č.6	2,852	2,812	2,833	3,053	3,087	3,043	3,028	3,062	3,069	2,915
Vlnovod č.7	2,681	2,616	2,81	2,854	2,876	2,823	2,87	2,952	2,873	2,936
Vlnovod č.8	2,706	2,899	2,796	2,964	2,885	2,8114	2,975	2,939	2,918	2,957
Vlnovod č.9	2,209	2,208	2,342	2,337	2,269	2,349	2,386	2,206	2,244	2,309
Vlnovod č.10	2,359	2,316	2,261	2,171	2,399	2,423	2,296	2,331	2,365	2,413

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,338	0,348	0,346	0,362	0,356	0,350	0,339	0,324	0,343	0,329
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,289	0,291	0,288	0,290	0,285	0,267	0,277	0,275	0,265	0,275
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,347	0,342	0,334	0,327	0,319	0,318	0,323	0,304	0,313	0,340
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,258	0,241	0,245	0,266	0,235	0,243	0,267	0,231	0,247	0,250
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,359	0,361	0,348	0,358	0,369	0,357	0,354	0,355	0,345	0,345
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,297	0,308	0,306	0,277	0,270	0,274	0,281	0,272	0,271	0,294
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,323	0,339	0,309	0,306	0,301	0,306	0,305	0,288	0,299	0,291
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,319	0,294	0,311	0,290	0,299	0,308	0,289	0,290	0,293	0,288
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,407	0,413	0,388	0,393	0,403	0,386	0,385	0,414	0,407	0,395
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,379	0,392	0,404	0,425	0,379	0,373	0,402	0,390	0,384	0,376

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	8,505	8,337	8,321	8,144	8,07	8,453	8,091	7,988	8	8,707
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	5,816	5,969	6,103	5,959	6,013	5,833	5,963	5,798	5,502	5,474
Vlnovod č.2	4,864	5,674	4,678	5,117	5,646	5,657	4,573	5,399	5,067	5,141
Vlnovod č.3	4,714	4,456	4,747	4,898	4,704	4,992	4,261	4,739	4,863	4,578
Vlnovod č.4	6,453	6,443	6,378	6,564	6,26	6,246	6,096	6,2	6,449	6,347
Vlnovod č.5	6,204	5,734	5,524	5,949	5,686	5,576	5,219	5,382	5,79	5,469
Vlnovod č.6	5,45	5,351	5,571	5,58	4,919	4,823	4,834	4,992	5,184	5,016
Vlnovod č.7	6,47	6,631	6,307	6,04	6,058	6,69	6,049	5,526	6,154	6,559
Vlnovod č.8	6,349	6,327	6,231	2,297	6,417	6,43	6,422	6,419	6,219	6,423
Vlnovod č.9	4,851	4,901	4,91	4,899	4,913	4,925	4,891	4,902	4,933	4,896
Vlnovod č.10	6,243	6,293	6,001	6,414	5,89	6,391	5,471	5,827	6,295	5,845

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,165	0,145	0,135	0,136	0,128	0,161	0,133	0,139	0,163	0,202
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,243	0,167	0,250	0,202	0,155	0,174	0,248	0,170	0,198	0,229
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,256	0,272	0,244	0,221	0,234	0,229	0,278	0,227	0,216	0,279
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,120	0,112	0,115	0,094	0,110	0,131	0,123	0,110	0,094	0,137
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,137	0,163	0,178	0,136	0,152	0,181	0,190	0,171	0,140	0,202
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,193	0,193	0,174	0,164	0,215	0,244	0,224	0,204	0,188	0,240
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,119	0,099	0,120	0,130	0,125	0,102	0,126	0,160	0,114	0,123
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,127	0,120	0,126	0,550	0,100	0,119	0,100	0,095	0,109	0,132
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,244	0,231	0,229	0,221	0,216	0,235	0,219	0,212	0,210	0,250
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,134	0,122	0,142	0,104	0,137	0,121	0,170	0,137	0,104	0,173



<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	5,845	5,813	5,822	5,789	5,829	5,746	5,778	5,775	5,824	5,794
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	3,052	3,131	3,104	3,322	3,108	3,095	3,139	3,221	2,924	3,025
Vlnovod č.2	3,028	3,156	3,078	2,923	2,763	2,928	2,903	2,742	2,897	2,74
Vlnovod č.3	3,446	3,51	3,449	3,24	3,493	3,397	3,406	3,314	3,209	3,223
Vlnovod č.4	3,103	3,06	3,114	3,06	2,996	2,883	2,959	2,849	2,868	2,772
Vlnovod č.5	3,463	3,763	3,653	3,711	3,5	3,687	3,322	3,661	3,305	3,427
Vlnovod č.6	3,425	3,644	3,584	3,578	3,395	3,23	3,312	3,399	3,361	3,341
Vlnovod č.7	3,148	3,243	3,089	3,205	3,001	2,874	2,823	3,196	2,863	2,749
Vlnovod č.8	3,45	3,268	3,232	3,165	3,129	3,159	3,226	3,386	3,122	2,954
Vlnovod č.9	2,925	3,126	3,079	2,913	3,069	2,869	2,936	3,041	2,732	2,628
Vlnovod č.10	3,258	3,425	3,409	3,362	3,214	3,387	3,158	3,103	3,223	3,115

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,282	0,269	0,273	0,241	0,273	0,269	0,265	0,254	0,299	0,282
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,286	0,265	0,277	0,297	0,324	0,293	0,299	0,323	0,303	0,325
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,229	0,219	0,227	0,252	0,222	0,228	0,230	0,241	0,259	0,255
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,275	0,279	0,272	0,277	0,289	0,300	0,291	0,307	0,308	0,320
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,227	0,189	0,202	0,193	0,222	0,193	0,240	0,198	0,246	0,228
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,232	0,203	0,211	0,209	0,235	0,250	0,242	0,230	0,239	0,239
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,269	0,253	0,275	0,257	0,288	0,301	0,311	0,257	0,308	0,324
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,229	0,250	0,256	0,262	0,270	0,260	0,253	0,232	0,271	0,293
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,301	0,269	0,277	0,298	0,279	0,302	0,294	0,279	0,329	0,343
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,254	0,230	0,232	0,236	0,259	0,230	0,262	0,270	0,257	0,270

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	4,008	3,719	3,77	3,872	4,059	3,891	4,008	4,036	4,008	4,008
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	1,064	1,218	1,056	1,023	1,012	1,011	1,025	1,031	0,945	0,916
Vlnovod č.2	0,959	1,023	0,945	0,936	0,919	0,846	0,856	0,823	0,806	0,823
Vlnovod č.3	1,105	0,967	0,981	0,913	0,954	0,831	1,002	0,955	0,897	0,834
Vlnovod č.4	1,304	1,227	1,192	1,136	1,051	1,015	1,195	1,014	1,037	1,009
Vlnovod č.5	0,780	0,742	0,693	0,674	0,673	0,677	0,680	0,638	0,662	0,624
Vlnovod č.6	0,538	0,534	0,556	0,519	0,518	0,553	0,529	0,513	0,609	0,520
Vlnovod č.7	1,089	1,105	1,071	1,027	1,061	1,018	0,965	0,982	0,930	0,898
Vlnovod č.8	1,027	1,011	1,005	1,067	1,027	1,085	1,065	1,081	1,035	1,028
Vlnovod č.9	1,242	1,243	1,221	1,043	1,100	1,126	1,033	1,026	1,013	1,041
Vlnovod č.10	1,167	1,134	1,144	1,085	1,147	1,267	1,127	1,056	1,021	1,169

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,576	0,485	0,553	0,578	0,603	0,585	0,592	0,593	0,628	0,641
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,621	0,561	0,601	0,617	0,645	0,663	0,670	0,690	0,697	0,687
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,560	0,585	0,585	0,627	0,629	0,671	0,602	0,626	0,650	0,682
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,488	0,482	0,500	0,533	0,587	0,584	0,526	0,600	0,587	0,599
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,711	0,700	0,735	0,759	0,780	0,759	0,771	0,801	0,782	0,808
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,872	0,843	0,832	0,873	0,894	0,848	0,880	0,896	0,819	0,887
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,566	0,527	0,547	0,576	0,583	0,582	0,618	0,614	0,635	0,650
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,591	0,566	0,574	0,560	0,597	0,555	0,576	0,572	0,588	0,591
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,509	0,476	0,490	0,570	0,567	0,539	0,589	0,595	0,597	0,585
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,536	0,516	0,518	0,553	0,549	0,487	0,551	0,582	0,594	0,535

Příloha D: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na žluté barvě*

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	1,605	1,613	1,617	1,604	1,603	1,606	1,63	1,633	1,622	1,628
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	0,822	0,837	0,807	0,808	0,869	0,968	0,885	0,977	0,914	0,956
Vlnovod č.2	0,877	0,966	0,923	0,984	0,887	0,937	0,911	0,918	0,894	0,923
Vlnovod č.3	1,009	0,979	0,872	0,868	0,835	0,893	0,832	0,836	0,844	0,824
Vlnovod č.4	0,808	0,823	0,890	0,889	0,859	0,939	0,820	0,824	0,816	0,843
Vlnovod č.5	0,832	0,921	0,960	0,875	0,912	0,918	0,838	0,878	0,872	0,932
Vlnovod č.6	0,836	0,882	0,951	1,019	1,028	0,907	0,959	0,897	0,882	0,977
Vlnovod č.7	1,022	0,876	0,965	0,979	0,926	0,860	0,889	0,940	0,849	0,964
Vlnovod č.8	0,881	0,860	1,018	1,038	1,032	0,874	0,931	0,898	0,946	0,989
Vlnovod č.9	0,919	0,843	0,833	0,934	0,906	0,864	0,858	0,848	0,816	0,849
Vlnovod č.10	0,870	0,821	0,819	0,868	0,873	0,833	0,837	0,813	0,838	0,869

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,290	0,285	0,302	0,298	0,266	0,220	0,265	0,223	0,249	0,231
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,262	0,223	0,243	0,212	0,257	0,234	0,253	0,250	0,259	0,246
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,202	0,217	0,268	0,267	0,283	0,255	0,292	0,291	0,284	0,296
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,298	0,292	0,259	0,256	0,271	0,233	0,298	0,297	0,298	0,286
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,285	0,243	0,226	0,263	0,245	0,243	0,289	0,270	0,270	0,242
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,283	0,262	0,231	0,197	0,193	0,248	0,231	0,260	0,264	0,222
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,196	0,265	0,224	0,215	0,238	0,271	0,263	0,240	0,281	0,228
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,260	0,273	0,201	0,189	0,191	0,264	0,243	0,259	0,234	0,216
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,242	0,282	0,288	0,235	0,248	0,269	0,279	0,284	0,298	0,283
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,266	0,293	0,295	0,267	0,264	0,285	0,289	0,303	0,287	0,273

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	1,818	1,802	1,739	1,75	1,749	1,749	1,756	1,759	1,721	1,733
Výstupní výkon [mW]										
Vlnovod č.1	1,122	1,087	1,066	1,142	1,150	1,147	1,115	1,181	1,153	1,177
Vlnovod č.2	1,003	1,042	1,052	1,174	1,002	1,038	1,160	1,033	1,143	1,119
Vlnovod č.3	0,962	1,000	0,918	0,910	1,085	1,056	1,013	1,031	1,028	1,037
Vlnovod č.4	1,115	1,094	1,033	1,129	1,118	1,146	1,080	1,253	1,099	1,118
Vlnovod č.5	0,957	0,990	0,948	0,967	1,114	0,994	1,149	1,026	1,001	1,099
Vlnovod č.6	1,032	0,989	0,938	1,058	1,082	1,068	1,073	1,157	1,023	1,037
Vlnovod č.7	1,096	1,091	1,095	1,195	1,068	1,026	1,210	1,104	1,127	1,160
Vlnovod č.8	1,236	1,147	1,144	1,101	1,126	1,105	1,114	1,157	1,143	1,137
Vlnovod č.9	0,938	0,935	0,931	0,924	0,924	0,916	0,935	0,922	0,939	0,957
Vlnovod č.10	1,040	1,022	1,012	1,087	1,122	1,132	1,043	1,107	1,102	1,113

<b>Poměr 10:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,210	0,220	0,213	0,185	0,182	0,183	0,197	0,173	0,174	0,168
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,258	0,238	0,218	0,173	0,242	0,227	0,180	0,231	0,178	0,190
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,277	0,256	0,277	0,284	0,207	0,219	0,239	0,232	0,224	0,223
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,212	0,217	0,226	0,190	0,194	0,184	0,211	0,147	0,195	0,190
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,279	0,260	0,263	0,257	0,196	0,245	0,184	0,234	0,235	0,198
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,246	0,261	0,268	0,219	0,209	0,214	0,214	0,182	0,226	0,223
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,220	0,218	0,201	0,166	0,214	0,232	0,162	0,202	0,184	0,174
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,168	0,196	0,182	0,201	0,191	0,199	0,198	0,182	0,178	0,183
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,287	0,285	0,271	0,277	0,277	0,281	0,273	0,280	0,263	0,258
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,243	0,246	0,235	0,207	0,193	0,189	0,226	0,201	0,194	0,192

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	2,407	2,383	2,396	2,463	2,404	2,358	2,277	2,321	2,42	2,448
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	1,863	1,846	1,885	1,817	1,871	1,836	1,841	1,791	1,822	1,868
Vlnovod č.2	1,816	1,758	1,902	1,751	1,87	1,722	1,617	1,687	1,677	1,682
Vlnovod č.3	1,783	1,768	1,754	1,798	1,83	1,767	1,646	1,627	1,77	1,73
Vlnovod č.4	1,736	1,814	1,754	1,784	1,735	1,719	1,625	1,304	1,771	1,726
Vlnovod č.5	1,926	1,886	1,94	1,941	1,835	1,839	1,745	1,643	1,836	1,812
Vlnovod č.6	1,869	1,878	2,005	1,803	1,816	1,816	1,75	1,801	1,828	1,808
Vlnovod č.7	1,676	1,653	1,858	1,739	1,731	1,78	1,669	1,663	1,727	1,699
Vlnovod č.8	1,755	1,729	1,926	1,774	1,859	1,791	1,636	1,676	1,746	1,665
Vlnovod č.9	1,802	1,862	1,746	1,712	1,653	1,741	1,618	1,556	1,61	1,623
Vlnovod č.10	1,643	1,823	1,841	1,834	1,792	1,757	1,721	1,726	1,756	1,634

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,111	0,111	0,104	0,132	0,109	0,109	0,092	0,113	0,123	0,117
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,122	0,132	0,100	0,148	0,109	0,137	0,149	0,139	0,159	0,163
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,130	0,130	0,135	0,137	0,118	0,125	0,141	0,154	0,136	0,151
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,142	0,118	0,135	0,140	0,142	0,137	0,147	0,250	0,136	0,152
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,097	0,102	0,092	0,103	0,117	0,108	0,116	0,150	0,120	0,131
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,110	0,103	0,077	0,135	0,122	0,113	0,114	0,110	0,122	0,132
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,157	0,159	0,110	0,151	0,143	0,122	0,135	0,145	0,147	0,159
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,137	0,139	0,095	0,143	0,112	0,119	0,144	0,141	0,142	0,167
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,126	0,107	0,137	0,158	0,163	0,132	0,148	0,174	0,177	0,178
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,166	0,116	0,114	0,128	0,128	0,128	0,122	0,129	0,139	0,176

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	1,846	1,754	1,827	1,807	1,835	1,837	1,849	1,801	1,867	1,782
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	1,065	1,022	1,038	1,025	1,002	0,971	0,905	0,968	0,843	0,797
Vlnovod č.2	1,001	0,946	0,955	0,940	0,944	0,841	0,858	0,817	0,661	0,720
Vlnovod č.3	1,043	1,011	1,009	1,013	1,015	1,086	0,987	0,981	0,927	0,891
Vlnovod č.4	1,083	1,061	1,036	1,047	1,030	1,006	0,942	0,941	0,883	0,876
Vlnovod č.5	0,704	0,711	0,718	0,723	0,725	0,727	0,720	0,598	0,589	0,574
Vlnovod č.6	0,519	0,519	0,520	0,520	0,520	0,520	0,543	0,441	0,438	0,472
Vlnovod č.7	0,927	0,913	0,925	0,940	0,938	0,777	0,740	0,730	0,744	0,794
Vlnovod č.8	1,030	1,026	1,024	1,013	1,021	0,937	0,956	0,941	0,998	0,970
Vlnovod č.9	1,021	1,006	1,012	1,020	1,003	0,922	0,956	0,798	0,840	0,810
Vlnovod č.10	1,051	1,056	1,089	1,024	1,062	1,043	0,964	0,940	0,852	0,867

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,239	0,235	0,246	0,246	0,263	0,277	0,310	0,270	0,345	0,350
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,266	0,268	0,282	0,284	0,289	0,339	0,334	0,343	0,451	0,394
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,248	0,239	0,258	0,251	0,257	0,228	0,272	0,264	0,304	0,301
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,232	0,218	0,246	0,237	0,251	0,262	0,293	0,282	0,325	0,308
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,419	0,392	0,406	0,398	0,404	0,403	0,409	0,479	0,501	0,492
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,551	0,529	0,546	0,541	0,548	0,548	0,532	0,611	0,630	0,577
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,299	0,283	0,296	0,284	0,291	0,373	0,398	0,392	0,400	0,351
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,253	0,233	0,251	0,251	0,255	0,292	0,287	0,282	0,272	0,264
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,257	0,241	0,257	0,248	0,262	0,299	0,286	0,354	0,347	0,342
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,245	0,220	0,225	0,247	0,238	0,246	0,283	0,282	0,341	0,313

Příloha E: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků na červené barvě*

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	3,016	3,027	3,024	3,019	3,031	3,004	3,046	3,059	3,015	3,028
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	1,701	1,787	1,817	1,793	1,833	1,788	1,815	1,786	1,741	1,769
Vlnovod č.2	1,775	1,965	1,967	1,892	1,992	1,882	1,896	1,981	1,909	1,892
Vlnovod č.3	1,781	1,754	1,77	1,825	1,815	1,834	1,818	1,886	1,824	1,801
Vlnovod č.4	1,857	1,937	1,91	2,074	2,044	2,039	2,029	2,034	2,029	2,027
Vlnovod č.5	1,754	1,727	1,712	1,727	1,676	1,674	1,676	1,781	1,712	1,67
Vlnovod č.6	1,872	1,859	1,943	1,822	1,872	1,847	1,822	1,882	1,936	1,885
Vlnovod č.7	1,878	1,861	1,85	1,843	1,88	1,886	1,863	1,918	1,886	1,883
Vlnovod č.8	1,856	1,931	1,853	1,86	1,858	1,856	1,828	1,85	1,855	1,86
Vlnovod č.9	1,593	1,6	1,563	1,624	1,533	1,629	1,665	1,517	1,635	1,525
Vlnovod č.10	1,513	1,428	1,69	1,493	1,648	1,668	1,638	1,652	1,584	1,666

<b>Poměr 8:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,249	0,229	0,221	0,226	0,218	0,225	0,225	0,234	0,238	0,233
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,230	0,188	0,187	0,203	0,182	0,203	0,206	0,189	0,198	0,204
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,229	0,237	0,233	0,219	0,223	0,214	0,224	0,210	0,218	0,226
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,211	0,194	0,200	0,163	0,171	0,168	0,176	0,177	0,172	0,174
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,235	0,244	0,247	0,243	0,257	0,254	0,259	0,235	0,246	0,258
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,207	0,212	0,192	0,219	0,209	0,211	0,223	0,211	0,192	0,206
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,206	0,211	0,213	0,214	0,207	0,202	0,214	0,203	0,204	0,206
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,211	0,195	0,213	0,210	0,213	0,209	0,222	0,218	0,211	0,212
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,277	0,277	0,287	0,269	0,296	0,266	0,262	0,305	0,266	0,298
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,300	0,326	0,253	0,306	0,265	0,256	0,269	0,268	0,280	0,259

Poměr 10:1										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	3,211	3,159	3,158	3,154	3,143	3,151	3,131	3,14	3,142	3,138
Výstupní výkon [mW]										
Vlnovod č.1	2,086	2,005	2,05	2,256	2,198	2,133	2,156	2,137	1,993	2,095
Vlnovod č.2	1,939	1,887	2,016	2,084	2,035	1,924	1,986	1,933	1,913	1,842
Vlnovod č.3	2,01	1,938	1,94	2,013	2,047	2,059	2,054	2,011	1,985	2,031
Vlnovod č.4	1,967	2,067	2,035	2,17	2,249	2,066	2,01	2,071	2,056	2,072
Vlnovod č.5	2,025	1,939	1,994	1,997	2,022	2,031	1,98	2,008	1,904	1,948
Vlnovod č.6	1,989	1,86	2,016	1,951	2,02	2,018	1,993	2,081	1,957	1,996
Vlnovod č.7	2,025	2,154	2,086	2,265	2,17	2,073	2,207	2,144	1,974	2,121
Vlnovod č.8	2,217	2,177	2,099	2,209	2,098	2,079	2,21	2,034	2,222	2,071
Vlnovod č.9	1,727	1,734	1,731	1,725	1,754	1,771	1,744	1,704	1,712	1,701
Vlnovod č.10	1,943	1,91	1,972	2,072	2,189	2,118	2,008	2,06	2	2,067

Poměr 10:1										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,187	0,197	0,188	0,146	0,155	0,169	0,162	0,167	0,198	0,175
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,219	0,224	0,195	0,180	0,189	0,214	0,198	0,211	0,215	0,231
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,203	0,212	0,212	0,195	0,186	0,185	0,183	0,194	0,199	0,189
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,213	0,184	0,191	0,162	0,145	0,183	0,192	0,181	0,184	0,180
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,200	0,212	0,200	0,198	0,192	0,191	0,199	0,194	0,218	0,207
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,208	0,230	0,195	0,209	0,192	0,194	0,196	0,179	0,206	0,196
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,200	0,166	0,180	0,144	0,161	0,182	0,152	0,166	0,202	0,170
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,161	0,162	0,177	0,155	0,176	0,181	0,151	0,189	0,150	0,180
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,269	0,261	0,261	0,262	0,253	0,250	0,254	0,265	0,264	0,266
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,218	0,219	0,205	0,182	0,157	0,173	0,193	0,183	0,196	0,181



<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	3,445	3,418	3,409	3,209	3,393	3,544	3,375	3,4	3,667	3,504
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	2,095	2,032	1,897	1,939	1,888	1,95	1,961	1,856	1,897	1,967
Vlnovod č.2	1,902	1,826	1,851	1,834	1,861	1,728	1,634	1,75	1,763	1,728
Vlnovod č.3	2,176	2,02	2,176	2,136	2,105	2,046	1,993	2,099	2,092	2,028
Vlnovod č.4	1,977	1,958	1,864	1,884	1,966	1,896	1,872	1,796	1,843	1,769
Vlnovod č.5	2,284	2,223	2,177	2,142	2,119	2,15	2,192	2,171	2,242	2,16
Vlnovod č.6	2,306	2,03	2,244	2,144	2,223	2,249	2,168	2,13	2,073	2,114
Vlnovod č.7	1,93	1,976	1,817	2,01	1,945	1,823	1,813	1,944	1,821	1,894
Vlnovod č.8	2,078	1,978	2,06	2,09	1,939	2,003	2,01	2,044	2,057	2,04
Vlnovod č.9	1,887	1,96	1,941	1,918	1,919	1,74	1,915	1,838	1,79	1,834
Vlnovod č.10	2,107	1,952	2,106	2,111	2,049	2,034	1,929	2,058	2,076	2,049

<b>Poměr 12:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,216	0,226	0,255	0,219	0,255	0,259	0,236	0,263	0,286	0,251
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,258	0,272	0,265	0,243	0,261	0,312	0,315	0,288	0,318	0,307
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,200	0,228	0,195	0,177	0,207	0,239	0,229	0,209	0,244	0,237
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,241	0,242	0,262	0,231	0,237	0,272	0,256	0,277	0,299	0,297
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,178	0,187	0,195	0,176	0,204	0,217	0,187	0,195	0,214	0,210
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,174	0,226	0,182	0,175	0,184	0,198	0,192	0,203	0,248	0,219
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,252	0,238	0,273	0,203	0,242	0,289	0,270	0,243	0,304	0,267
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,220	0,238	0,219	0,186	0,243	0,248	0,225	0,221	0,251	0,235
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,261	0,242	0,245	0,224	0,248	0,309	0,246	0,267	0,311	0,281
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,214	0,243	0,209	0,182	0,219	0,241	0,243	0,218	0,247	0,233

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vstupní výkon [mW]	2,74	3,04	3,053	3,034	3,028	3,058	3,065	3,109	3,078	3,044
<b>Výstupní výkon [mW]</b>										
Vlnovod č.1	1,007	1,008	0,917	0,985	0,996	0,971	0,963	0,953	0,961	0,995
Vlnovod č.2	0,851	0,858	0,849	0,879	0,871	0,805	0,831	0,896	0,763	0,801
Vlnovod č.3	0,867	0,916	0,885	0,909	0,911	0,934	0,845	0,901	0,844	0,861
Vlnovod č.4	1,034	1,078	1,064	1,049	1,060	1,015	1,055	1,070	1,028	1,051
Vlnovod č.5	0,772	0,759	0,799	0,800	0,760	0,728	0,821	0,808	0,746	0,733
Vlnovod č.6	0,480	0,500	0,507	0,506	0,525	0,520	0,499	0,520	0,534	0,564
Vlnovod č.7	1,084	1,076	1,026	1,087	1,049	1,019	0,943	1,025	1,025	1,114
Vlnovod č.8	1,032	1,039	1,057	1,040	1,005	0,965	1,032	1,043	1,078	1,063
Vlnovod č.9	1,053	1,053	1,038	0,953	1,018	1,046	1,100	1,021	1,022	1,024
Vlnovod č.10	1,000	1,079	1,047	1,126	1,069	1,046	1,017	0,975	0,961	1,058

<b>Poměr 14:1</b>										
	1. série	2. série	3. série	4. série	5. série	6. série	7. série	8. série	9. série	10. série
Vlnovod č.1 [dB/cm]	0,435	0,479	0,522	0,488	0,483	0,498	0,503	0,513	0,506	0,485
Vlnovod č.2 [dB/cm]	0,508	0,549	0,556	0,538	0,541	0,580	0,567	0,540	0,606	0,580
Vlnovod č.3 [dB/cm]	0,500	0,521	0,538	0,523	0,522	0,515	0,559	0,538	0,562	0,549
Vlnovod č.4 [dB/cm]	0,423	0,450	0,458	0,461	0,456	0,479	0,463	0,463	0,476	0,462
Vlnovod č.5 [dB/cm]	0,550	0,603	0,582	0,579	0,600	0,623	0,572	0,585	0,616	0,619
Vlnovod č.6 [dB/cm]	0,756	0,783	0,780	0,778	0,761	0,770	0,788	0,777	0,761	0,732
Vlnovod č.7 [dB/cm]	0,403	0,451	0,474	0,446	0,460	0,477	0,512	0,482	0,478	0,437
Vlnovod č.8 [dB/cm]	0,424	0,466	0,461	0,465	0,479	0,501	0,473	0,474	0,456	0,457
Vlnovod č.9 [dB/cm]	0,415	0,460	0,469	0,503	0,473	0,466	0,445	0,484	0,479	0,473
Vlnovod č.10 [dB/cm]	0,438	0,450	0,465	0,430	0,452	0,466	0,479	0,504	0,506	0,459

<b>Bílá barva</b>				
<b>Vytvrzené vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,411	1,412	1,411	1,4105
<b>Vzorek č.2</b>	1,411	1,411	1,4105	1,4105
<b>Vzorek č.3</b>	1,412	1,411	1,411	1,4105
<b>Vzorek č.4</b>	1,412	1,411	1,411	1,411
<b>Vzorek č.5</b>	1,412	1,412	1,411	1,411
<b>Vzorek č.6</b>	1,411	1,411	1,4105	1,411
<b>Vzorek č.7</b>	1,411	1,411	1,411	1,412
<b>Vzorek č.8</b>	1,412	1,412	1,411	1,411
<b>Vzorek č.9</b>	1,411	1,411	1,411	1,412
<b>Vzorek č.10</b>	1,411	1,411	1,411	1,411
<b>Průměr</b>	1,411	1,411	1,411	1,411

<b>Modrá barva</b>				
<b>Vytvrzené vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,411	1,411	1,410	1,411
<b>Vzorek č.2</b>	1,411	1,410	1,410	1,411
<b>Vzorek č.3</b>	1,411	1,411	1,410	1,412
<b>Vzorek č.4</b>	1,412	1,411	1,411	1,412
<b>Vzorek č.5</b>	1,411	1,410	1,411	1,412
<b>Vzorek č.6</b>	1,411	1,411	1,410	1,411
<b>Vzorek č.7</b>	1,411	1,411	1,410	1,412
<b>Vzorek č.8</b>	1,412	1,410	1,410	1,411
<b>Vzorek č.9</b>	1,411	1,411	1,411	1,412
<b>Vzorek č.10</b>	1,411	1,411	1,411	1,411
<b>Průměr</b>	1,411	1,411	1,410	1,412

<b>Zelená barva</b>				
<b>Vytvrzené vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,411	1,411	1,411	1,409
<b>Vzorek č.2</b>	1,411	1,410	1,411	1,410
<b>Vzorek č.3</b>	1,411	1,410	1,411	1,410
<b>Vzorek č.4</b>	1,411	1,411	1,411	1,410
<b>Vzorek č.5</b>	1,410	1,410	1,411	1,411
<b>Vzorek č.6</b>	1,410	1,411	1,411	1,410
<b>Vzorek č.7</b>	1,411	1,410	1,411	1,411
<b>Vzorek č.8</b>	1,411	1,410	1,411	1,410
<b>Vzorek č.9</b>	1,411	1,410	1,411	1,410
<b>Vzorek č.10</b>	1,411	1,410	1,411	1,410
<b>Průměr</b>	1,411	1,410	1,411	1,410

<b>Žlutá barva</b>				
<b>Vytvrzené vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,411	1,412	1,4115	1,410
<b>Vzorek č.2</b>	1,411	1,411	1,411	1,4115
<b>Vzorek č.3</b>	1,412	1,411	1,411	1,410
<b>Vzorek č.4</b>	1,412	1,411	1,411	1,410
<b>Vzorek č.5</b>	1,411	1,411	1,412	1,410
<b>Vzorek č.6</b>	1,411	1,411	1,411	1,4115
<b>Vzorek č.7</b>	1,411	1,411	1,411	1,410
<b>Vzorek č.8</b>	1,411	1,412	1,411	1,410
<b>Vzorek č.9</b>	1,412	1,412	1,411	1,4115
<b>Vzorek č.10</b>	1,412	1,412	1,411	1,4115
<b>Průměr</b>	1,411	1,411	1,411	1,411

Červená barva				
	8:1	10:1	12:1	14:1
Index lomu [-]				
Vzorek č.1	1,412	1,412	1,412	1,411
Vzorek č.2	1,411	1,411	1,411	1,412
Vzorek č.3	1,411	1,411	1,411	1,411
Vzorek č.4	1,411	1,412	1,4115	1,411
Vzorek č.5	1,412	1,412	1,411	1,411
Vzorek č.6	1,411	1,411	1,412	1,412
Vzorek č.7	1,411	1,411	1,411	1,411
Vzorek č.8	1,411	1,412	1,411	1,412
Vzorek č.9	1,411	1,411	1,411	1,411
Vzorek č.10	1,411	1,411	1,411	1,411
Průměr	1,411	1,412	1,411	1,411

<b>Bílá barva</b>				
<b>Tekuté vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.2</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.3</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.4</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.5</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.6</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.7</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.8</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.9</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Vzorek č.10</b>	1,409	1,409	1,410	1,410
<b>Průměr</b>	1,409	1,409	1,410	1,410

<b>Modrá barva</b>				
<b>Tekuté vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.2</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.3</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.4</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.5</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.6</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.7</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.8</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.9</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.10</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Průměr</b>	1,410	1,410	1,410	1,409

<b>Zelená barva</b>				
<b>Tekuté vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.2</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.3</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.4</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.5</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.6</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.7</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.8</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.9</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Vzorek č.10</b>	1,409	1,409	1,410	1,409
<b>Průměr</b>	1,409	1,409	1,410	1,409

<b>Žlutá barva</b>				
<b>Tekuté vzorky</b>	<b>8:1</b>	<b>10:1</b>	<b>12:1</b>	<b>14:1</b>
Index lomu [-]				
<b>Vzorek č.1</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.2</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.3</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.4</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.5</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.6</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.7</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.8</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.9</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Vzorek č.10</b>	1,410	1,410	1,410	1,409
<b>Průměr</b>	1,410	1,410	1,410	1,409

Červená barva				
Tekuté vzorky	8:1	10:1	12:1	14:1
Index lomu [-]				
Vzorek č.1	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.2	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.3	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.4	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.5	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.6	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.7	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.8	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.9	1,409	1,409	1,410	1,410
Vzorek č.10	1,409	1,409	1,410	1,410
Průměr	1,409	1,409	1,410	1,410